



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Planaltina – FUP
Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e
Desenvolvimento Rural – PPG-Mader



SOFIA MARTINS CARVALHO

**AGRICULTURA AGROFLORESTAL SUCESSIONAL COMO ESTRATÉGIA DE
MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UM ESTUDO DE CASO EM CULTIVOS
DE CAFÉ NO DISTRITO FEDERAL**

Planaltina

2025

**Agricultura agroflorestal Sucessional como estratégia de mitigação das mudanças climáticas:
um estudo de caso em cultivos de café no Distrito Federal**

Linha: Desenvolvimento sustentável rural e sociobiodiversidade

Sofia Martins Carvalho

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural (PPG-MADER), da Faculdade UnB de Planaltina (FUP), Universidade de Brasília (UnB), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestra em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural.

Orientadora: Profa. Dra. Suzi Huff Theodoro

Planaltina
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

CC331 Carvalho, Sofia Martins
Agricultura agroflorestal Sucessional como estratégia de
mitigação das mudanças climáticas: um estudo de caso em
cultivos de café no Distrito Federal / Sofia Martins
Carvalho; orientador Suzi Huff Theodoro. Brasília, 2025.
56 p.

Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento
Rural) Universidade de Brasília, 2025.

1. Agroecologia. 2. Sistemas Agroflorestais. 3. Carbono
Orgânico do Solo. 4. Mitigação das mudanças climáticas. 5.
Sequestro de Carbono. I. Huff Theodoro, Suzi, orient. II.
Título.

AGRICULTURA AGROFLORESTAL SUCESSIONAL COMO ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO
DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UM ESTUDO DE CASO EM CULTIVOS DE CAFÉ NO
DISTRITO FEDERAL

Dissertação de mestrado avaliada pela seguinte banca examinadora:

Prof^ª. Dr^a Suzi Huff Theodoro (FUP-UnB)
Orientadora

Prof. Dr. Tamiel Khan Baiocchi Jacobson (FUP/UnB)
Avaliador – Membro interno

Prof. Dr. André Mundstock Xavier de Carvalho (UFV)
Avaliador – Membro externo

Agradecimentos

Às três Marias que me guiam e que me compõem, agradeço pela dádiva de ser uma poeirinha cósmica a gravitar justo nessa constelação de mulheres. À vovó, pelo amor e compromisso com a roça, com os bichos e com as pessoas. Sua memória é fonte inesgotável de coragem e sabedoria. À mamãe, pela ternura e leveza. Por nos inspirar a perceber o mundo com a doçura no seu olhar. Seu espírito de cooperação e solidariedade profunda me encanta. À minha filha, pela experiência radical de afeto e cuidado. Compartilhar a vida juntas é minha maior sorte e alegria.

Ao meu pai, por nossa cumplicidade inabalável, por sua racionalidade tão poética quanto pragmática. Te vejo como uma árvore majestosa que me abriga, onde pousam e cantam lindos pássaros.

À minha irmã Anaya, pela parceria, pela generosidade, pelos incontáveis *vale-night* sem os quais essa dissertação não existiria.

Ao Rômulo, meu amado, com quem pelejo e desfruto a saga de uma agricultura familiar e agroflorestal. A beleza rara em sua maneira de olhar e interagir com o ecossistema renova cotidianamente minha admiração e desejo de amadurecermos juntos.

Aos meus tios Juá e Edward, que me cuidam como filha e são alicerces fundamentais na minha vida.

Ao Ernst, por traduzir a linguagem das plantas e abrir caminhos para os conhecimentos mais instigantes sobre nosso papel em um planeta regido pela fotossíntese.

À minha orientadora, Suzi Huff, por seu apoio imprescindível neste e outros trabalhos. Por encorajar mães que ousam fazer ciência e acolher os desafios particulares desta complexidade. Por dosar rigor e ternura na medida necessária.

Ao meu irmão Martin e minha irmã Júlia. Duas presenças iluminadas e cheias de graça em minha vida.

À Gio, por ensinar tanto a partir do seu olhar raro. Nossa amizade é um acalanto.

Ao Gustavo Lobo, pela parceria de todas as horas, inclusive na coleta de amostras de solos no pico da seca e do calor.

Ao Lucas Costa, pela contribuição fundamental nas análises de geoprocessamento desta pesquisa e pelas infinitas risadas que desfrutamos nessa amizade longa.

Aos professores Tamiel Jacob, André Mundstock, Íris Roitman e Rômulo Ribeiro, meu profundo agradecimento pelo apoio imprescindível nesta pesquisa e pelos valiosos aprendizados compartilhados.

Ao Sr. Coutinho, pela gentileza de abrir a porteira de sua fazenda e se dispor a contribuir com esta pesquisa.

À Viviane Oliveira, pela generosidade em me auxiliar com a produção de mapas. À Guta, à Val, à Ivone, à Irmã Carmen, à Dona Nilza e a todas as mulheres da roça. Pela parceria, pela escuta, pelo olhar, pelas histórias compartilhadas de lutas, lutos e glórias.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que se dedicam à *arte de colher e guardar o sol*: a agricultura.

Quem hoje é vivo corre perigo
E os inimigos do verde da sombra e o ar
Que se respira e a clorofila
Das matas virgens destruídas vão lembrar

Que quando chegar a hora
É certo que não demora
Não chame Nossa Senhora
Só quem pode nos salvar

É caviúna, cerejeira, baraúna
Imbuia, pau-d'arco, solva
Juazeiro e jatobá

Gonçalo-alves, paraíba, itaúba
Louro, ipê, paracaúba
Peroba, massaranduba

Carvalho, mogno, canela, imbuzeiro
Catuaba, janaúba, aroeira, araribá
Pau-ferro, angico, amargoso, gameleira
Andiroba, copaíba, pau-brasil, jequitibá

- Augusto Jatobá

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	8
Lista de tabelas.....	9
Resumo.....	10
Abstract	11
1. Introdução.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Os usos da terra na agenda de mitigação das mudanças climáticas.....	16
2.2 O modelo agroindustrial de monocultivos no Brasil.....	18
2.3 A matéria orgânica (MO) e as mudanças do clima.....	20
2.4. Sistemas agroflorestais (SAF).....	22
2.5 Os Sistemas Agroflorestais Sucessionais (SAFS).....	26
3. METODOLOGIA.....	30
3.1. Caracterização regional da área de pesquisa.....	30
3.2. Amostragem e análise do solo.....	32
3.3. Análise de Índice de Vegetação Ajustado pelo Solo Otimizado (OSAVI).....	33
3.4. Análise estatística.....	34
4. Descrição do manejo e do histórico das áreas.....	34
4.1.1 Manejo agroflorestal – Sítio Raíz.....	34
4.1.2. Histórico do Sítio Raíz.....	35
4.2.1. Manejo convencional - Fazenda Novo Horizonte.....	37
4.2.2 – Histórico da Fazenda Novo Horizonte.....	38
4.3 Área em Pousio.....	39
5. Resultados	39
5.1. Riqueza de espécies vegetais e diversidade funcional nos agroecossistemas.....	39
5.2. Manejo agroflorestal baseado em podas sistemáticas.....	42
5.3. Atributos químicos do solo.....	43
5.4. Análise de densidade e vigor de vegetação por sensoriamento remoto	44
6. Discussão.....	45
7. Conclusões.....	51
8. Referências.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metas e mitigação do Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC ⁺).....	18
Figura 2. Representação da estratificação e dos consórcios dominantes nos ciclos da sucessão ecológica aplicados ao planejamento de um agroecossistema. Curso de Agrofloresta, 2023, por Rômulo Araujo. Estágios sucessionais: Placenta; Secundária I; Secundária II; Clímax.....	27
Figura 3. Mapa de localização das áreas da pesquisa e a inserção do Núcleo Rural Lago Oeste, Brasília (DF) no contexto regional.....	31
Figura 4. Mapa das Unidades de Conservação do Núcleo Rural Lago Oeste. Fonte: GREENTEC, 2010 – Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA) Núcleo Rural Lago Oeste.....	31
Figura 5. Área de sobrevôo do VANT sobre (a) Monocultivo - Mono e (b) Sistema Agroflorestal - SAF. OSAVI de Mono (c) e SAF (d). Limites em vermelho representam a área amostrada. Quadrantes em laranja representam as amostras, distribuídas aleatoriamente, com 100 valores gerados para SAF e 120 para Mono.....	33
Figura 6. SAFS: Sistema Agroflorestal Sucessional com foco em cafeicultura do Sítio Raíz, 2024. Lago Oeste/DF	35
Figura 7. Amostragem de solo na área de café em sistema de monocultivo – Fazenda Novo Horizonte, 2024. Lago Oeste/DF.....	37
Figura 8. Área em pousio, 2024. Lago Oeste/DF.....	39
Figura 9. Riqueza de espécies vegetais e funcionalidade em termos de potencial econômico e de deposição de biomassa em SAF, Monocultivo e Pousio.....	41
Figura 10. Relação da quantidade de indivíduos perenes em SAF e em Monocultivo e a classificação de suas respectivas espécies no espectro de estratificação da Agricultura Sintrópica	42
Figura 11. Relação entre a densidade de indivíduos perenes manejados e a frequência anual de podas em cada espécie na área amostrada de SAFS.....	43
Figura 12. Atributos químicos do solo amostrados na estação seca (T1) e chuvosa (T2) em monocultivo de café, área em pousio e sistema agroflorestal de café (SAF). (A) COS, (B) pH, (C) P disponível, (D) K disponível. Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0.05).....	44
Figura 13. Comparação entre gradientes de valores de Índice de Vegetação OSAVI em SAF e Monocultivo.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Legislações estabelecidas no Brasil com fins de proteção do meio ambiente e que resultam em efeitos nas mudanças climáticas.....	17
Tabela 2. Levantamento de espécies e quantificação dos indivíduos perenes (arbóreos apenas com >1,6m) em SAFS, Monocultivo e Pousio. *Nomenclatura em verde designa espécies perenes lenhosas e bananeiras.....	41
Tabela 3. Manejo das podas realizadas na área amostrada de SAFS (Sitio Raíz).....	42

Resumo

A mudança no uso da terra, como o desmatamento e a expansão agrícola baseada em um modelo agroindustrial de monocultivos, é a principal fonte de emissões de GEE no Brasil, reduzindo os estoques de carbono na biomassa e nos solos. Para reverter este quadro, a proteção dos ecossistemas e a intensificação da captura de C por agroecossistemas com maior cobertura vegetal e menor dependência de insumos energeticamente dispendiosos são vitais. Nesse sentido, os Sistemas Agroflorestais (SAFs) representam um mecanismo-chave para otimizar a fotossíntese e aumentar o teor de matéria orgânica (MO) no solo devido à densidade arbórea e o manejo da estratificação e sucessão vegetal, sequestrando C de forma eficaz. O objetivo deste trabalho foi comparar aspectos edáficos e de reflectância solar em duas áreas de produção de café no Distrito Federal/Brasil: uma sob monocultivo (Mono) e outra em Sistema Agroflorestal Sucessional (SAF). Como tratamento controle, foi analisado uma área em pousio (Pousio), onde não há manejo. A metodologia incluiu a coleta de amostras de solo (0-30 cm) nas estações seca e chuvosa para quantificar pH, COS, P, K. Adicionalmente, um sobrevôo com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) captou imagens verticais para calcular o Índice de Vegetação OSAVI e verificar as diferenças de vigor e densidade da vegetação entre os agroecossistemas. Entrevistas foram conduzidas para avaliar a composição florística, o histórico e o manejo das áreas. As análises revelaram um desempenho superior do SAF em relação ao pH e K disponível, e destacou expressiva superioridade em termos do teor de COS (79,2% maior que em Mono). A média dos valores do Índice de Vegetação OSAVI foi 285% superior em SAF (0,647) comparado à Mono (0,168), ($p < 0.001$). Os resultados reforçam a relevância estratégica dos Sistemas Agroflorestais Sucessionais para a agenda de mitigação das mudanças climáticas, posicionando-os como Soluções Naturais Climáticas para a redução das emissões e o sequestro de carbono na agricultura.

Palavras-chave: Agroecologia; Agroecossistemas; Agricultura Sintrópica; Sistemas Agroflorestais; Carbono Orgânico no Solo.

Abstract

Land-use change, such as deforestation and agricultural expansion based on an agroindustrial model of plantations is the main source of greenhouse gas (GHG) emissions in Brazil, reducing carbon stocks in biomass and soils. To reverse this scenario, the protection of ecosystems and the enhancement of carbon (C) sequestration by agroecosystems with greater vegetation cover and lower dependence on energy-intensive inputs are essential. In this context, Agroforestry Systems (AFS) represent a key mechanism to optimize photosynthesis and increase soil organic matter (SOM) content due to higher tree density and the management of vegetation stratification and succession, thereby effectively sequestering carbon. The aim of this study was to compare chemical attributes in soil and solar reflectance in two coffee production areas in the Federal District, Brazil: one under monoculture (Mono) and the other under a successional agroforestry system (SAFS). A fallow area (Fallow) was used as a control treatment. The methodology included soil sampling (0–30 cm) during the dry and rainy seasons to quantify pH, SOC, P and K. Additionally, an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) overflight captured vertical images to calculate the Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI) and assess differences in vegetation vigor and density among the agroecosystems. Interviews were conducted to evaluate floristic composition, land-use history, and management practices. The analyses revealed superior performance of the SAFS in terms of pH and available K, and higher SOC content (79.2% greater compared to the monoculture). Mean OSAVI values were 285% higher in the SAFS (0.647) compared to the monoculture system (0.168) ($p < 0.001$). These results reinforce the strategic role of successional agroforestry systems as Nature-Based Climate Solutions for mitigating climate change through carbon off setting in agriculture.

Keywords: Agroecology; Agroecosystems; Syntropic Agriculture; Agroforestry Systems; Soil Organic Carbon.

1. Introdução

A temperatura média global é um indicador do balanço energético entre a absorção e a irradiação da luz solar na superfície e na atmosfera terrestre (BARBOSA, 2014). O monitoramento das variações climáticas demonstra, de maneira inequívoca, uma tendência de aquecimento em uma velocidade superior ao que cientistas estimavam para a primeira metade do século XXI (IPCC, 2023).

A última década (2015-2024) registrou os dez anos mais quentes desde as primeiras aferições globais. Culminou, em 2024, com a média mais elevada já registrada, uma anomalia estimada em 1,55°C (WMO, 2025)¹. Desde 1982, a progressão desse aquecimento tem ocorrido em média com 0.20°C por década, o que significa um aumento três vezes maior do que nas décadas anteriores (NOAA, 2025).

A elevada concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE), resultante das atividades humanas baseadas na queima de combustíveis fósseis e agravadas pelas mudanças de uso da terra (WMO, 2025), compromete a capacidade da atmosfera de irradiar o calor de volta para o espaço em proporções iguais ou superiores à sua absorção (BARBOSA, 2014).

O aumento de 1,5°C na temperatura média desde a era pré-industrial afeta a circulação de energia em todos os sistemas terrestres e seu efeito concreto sobre a circulação de energia em todos os sistemas terrestres é de grande impacto (WMO, 2025). Considerando-se o curto tempo geológico em que ocorreu, esse aumento representa grave ameaça à manutenção dos processos ecológicos dos quais dependem as formas de vida que habitam o planeta (WMO, 2025), uma vez que os ciclos biogeoquímicos do carbono e da água são, de maneira geral, drasticamente afetados.

As projeções matemáticas que simulam os cenários futuros demonstram que os esforços de contenção das emissões de GEE têm sido insuficientes para reverter o quadro de aumento contínuo (LENTON *et al.*, 2019). Ao contrário, a concentração atmosférica de metano (CH₄) está 266% maior, seguida pelo dióxido de carbono (CO₂, 151%), com índice mais elevado desde os últimos 800 mil anos (420 ppm), e, por fim, o óxido nitroso (N₂O) está 124% maior comparado à era pré-industrial (WMO, 2025).

Buscando pactuar estratégias de alcance global, as Nações Unidas (ONU) convocam, anualmente, as Conferências das Partes (COP's) em busca de consolidar consensos e negociar mecanismos regulatórios que promovam avanços na agenda de mitigação e adaptação às mudanças climáticas entre os países signatários (ANIS *et al.*, 2022, OLIVEIRA, 2023). Nestas ocasiões, os

¹ Em comparação com os níveis pré-industriais

relatórios publicados pelo Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC) sistematizam e atualizam os dados mais relevantes a respeito da ciência do clima, os quais subsidiam as discussões em torno das ações que deverão ser empreendidas pelos países.

Entre as ações, a transição da matriz energética é a medida mais urgente para a efetiva reversão das emissões globais, em virtude da ordem de grandeza que este setor representa (WMO, 2025a). Não obstante, no caso do Brasil, a mudança de uso da terra é a principal fonte das emissões. Os processos de expansão da fronteira agrícola, frequentemente associados ao desmatamento, têm resultado na migração de Carbono (C) da biomassa para a atmosfera e na diminuição dos estoques de C orgânico do solo (COS) (GANZENMULLER et al 2025). Além disso, o modelo de monocultura agroindustrial é dependente de cadeias produtivas globalizadas tanto para a aquisição de insumos energeticamente dispendiosos quanto para a comercialização da produção (Theodoro et al, 2022), o que maximiza os passivos ambientais associados ao transporte, armazenamento, cadeia de frios, desperdícios pós-colheita, etc. (Dynarski et al. 2020).

Devido ao metabolismo fotossintético das plantas, baseado no consumo de CO₂ atmosférico e na manutenção de grandes estoques de C no solo e na vegetação, as florestas são sumidouros de carbono particularmente importantes (ALBRECHT, KANDJI, 2003). Nelas coexistem uma infinidade de organismos mantenedores dos serviços ecossistêmicos que otimizam a atividade fotossintética e a retenção de C no solo e na vegetação (TERASAKI HART *et al.*, 2023; KOUTIKA, 2023). Por essa razão, proteger os ecossistemas naturais e favorecer agroecossistemas que conciliam atividade produtiva com o plantio e manejo de florestas são medidas especialmente relevantes para reverter o quadro das emissões (IPCC, 2023, SEEG, 2024).

No âmbito da terminologia que designa os mecanismos acordados para a cooperação internacional, as Soluções Climáticas Naturais (*Natural Climate Solution – NCS*) referem-se a usos da terra que efetivamente contribuem para a redução das emissões sem comprometer a produção de alimentos e tampouco ameaçar a biodiversidade (TERASAKI HART *et al.*, 2023). Este conceito lança luz sobre os Sistemas Agroflorestais (SAF), classificados como uma das atividades de sequestro de C, pela Convenção das Mudanças Climáticas da ONU (UNFCCC) e, também, validados como estratégia de mitigação de GEE pelo protocolo de Kyoto (op. cit.). Consolidados como uma das tecnologias da Agricultura de Baixo Carbono (BRASIL, 2021), os SAF são sistemas produtivos que integram, de maneira deliberada, espécies lenhosas perenes com algum grau de interação entre essas e demais cultivos agrícolas e/ou criação animal (NAIR, 1993).

Ao se basearem em um conjunto de princípios e técnicas que oportunizam cultivos agrícolas e/ou sistemas pastoris concomitantes à inserção de espécies arbóreas, os SAF favorecem maior

cobertura vegetal, promovem a reciclagem de recursos produzidos internamente à unidade agrícola (PASINI, 2017) e conciliam geração de renda com prestação de serviços ambientais diversos (GLIESSMAN, 2001). A ampliação do potencial de estocar carbono é uma das várias virtudes desses sistemas, como visto em diversas experiências no Brasil e no mundo (TERASAKI HART *et al.*, 2023; JACOBI *et al.*, 2025).

Posicionar as agroflorestas no centro do debate em torno dos mecanismos eficientes para a mitigação das mudanças do clima (CARDINAEL *et al.* 2021; KOUTIKA, 2023) e para a resolução de problemas críticos gerados pelo modelo desenvolvimentista de extração predatória é um esforço científico relevante e coerente com os desafios contemporâneos. Sobretudo considerando que o número de agricultores e agricultoras que adotam esses sistemas produtivos no Brasil é, ainda, pequeno diante de seu potencial. Há, por um lado, um caminho investigativo frutífero para elucidar os desafios desse segmento. Por outro, a necessidade de esforços institucionais para solucioná-los.

O presente trabalho coloca em evidência as particularidades e contribuições da categoria *SAF Sucessional* (SAFS) como uma opção de Solução Climática Natural, que adota princípios da Agricultura Sintrópica (AS) para reproduzir e acelerar dinâmicas ecológicas análogas aos ecossistemas naturais na atividade agropecuária (PENEREIRO, 1999; PASINI, 2017; JACOBI *et al.*, 2025).

Uma pesquisa de campo foi realizada para avaliar aspectos edáficos e de reflectância solar em dois tipos de agroecossistemas de um mesmo setor – a cafeicultura. Apesar de adotarem estratégias de manejo distintas, como será discutido, ambos possuem características e objetivos em comum. A implantação dos cafeeiros nas áreas avaliadas ocorreu em uma mesma época (2015 – 2017). Os agroecossistemas estão situados no Núcleo Rural Lago Oeste (Distrito Federal - DF), em região de Cerrado, na Bacia Hidrográfica do Rio Maranhão, sob condições edafo-climáticas semelhantes.

A paisagem na região retrata o histórico de legislação ambiental e a resistência de seus habitantes à pressão urbanizadora. Um mosaico de Unidades de Conservação (UC) regulamenta as possibilidades de ocupação e atividade humana em cada fragmento do território. O Núcleo Rural Lago Oeste (NRLO) faz fronteira com o Parque Nacional de Brasília e a Reserva Biológica da Contagem (UCs de Proteção Integral), sendo, portanto, uma zona de amortecimento que deve preservar características adequadas à mitigação dos impactos antrópicos nos ecossistemas adjacentes (PDOT 2020-2030).

As elevadas altitudes e o relevo planáltico da região exercem um papel fundamental para a recarga hídrica do lençol freático e a manutenção das bacias hidrográficas (AMARAL, 2021). Além da relevância ambiental, essas características propiciam boas condições para o desenvolvimento da

cafeicultura. A aptidão desta atividade para regiões mais altas está relacionada ao fato de que o centro de origem da espécie *Coffea Arabica* situa-se em áreas de floresta na Etiópia com altitudes que variam entre 1600 e 2800 m acima do nível do mar (DAMATTA, 2004).

Considerando as características do ambiente nativo dos cafeeiros, onde estes ocupam o sub-bosque de florestas caducifólias, a temperatura média anual ideal para a cafeicultura é em torno de 18 a 21 C° (ALÈGRE, 1959 apud DAMATTA, 2004). Temperaturas pouco acima desse padrão aceleram o processo de amadurecimento dos frutos e prejudicam sua qualidade. A exposição prolongada a médias de 30° em diante resulta em prejuízos ao desenvolvimento da planta e, durante o estágio de floração, especialmente se concomitante à estação seca – como é o caso do Distrito Federal – pode causar aborto das inflorescências (CAMARGO, 1985 apud DAMATTA, 2004).

Diferentemente de outros países de tradição cafeeira, como a Colômbia, onde os cafés são cultivados de forma sombreada, sob a copa de outras árvores (SOUZA *et al*, 2012), na cafeicultura brasileira predominam sistemas de monocultivo a pleno sol (DAMATTA, 2004). O café é uma das principais *commodities* no mercado internacional e o Brasil é o maior produtor (SOUZA *et al*, 2012). A relevância deste segmento é preponderante econômica, cultural e ambientalmente.

Considerando o contexto ambiental do NRLO e o papel imprescindível do Cerrado para a manutenção dos serviços ecossistêmicos no continente, as normas que regulamentam o uso e a ocupação do solo na região visam não apenas conter danos, mas estimular atividades coerentes com o propósito das Unidades de Conservação (PDOT 2020-2030). Diante das emergências climáticas, fomentar usos de terra que sirvam a esse objetivo é uma questão fundamental.

Nessa perspectiva, o intuito deste trabalho é comparar agroecossistemas e investigar a influência da cobertura vegetal e do manejo sobre parâmetros de fertilidade e de estocagem de carbono orgânico do solo (COS). Para tanto, foram realizadas amostragem de solos em três áreas: uma em Sistema Agroflorestal Sucessional (SAFS) de café, uma em sistema de monocultivo convencional de café (Mono) e uma área em pousio (Pousio) (sem manejo antrópico há cerca de 20 anos), como tratamento controle. Adicionalmente, um sobrevôo com Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) foi realizado nos talhões de cafeicultura de SAF e de Mono para aferir dados do vigor e densidade da vegetação dos agroecossistemas.

Com a finalidade de compreender o histórico e as estratégias de manejo das áreas, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com os proprietários (HUNTINGTON, 2000; NEUMAN, 2006). As respostas foram sistematizadas e as informações relativas aos tipos de insumos utilizados,

as espécies vegetais e as estratégias de implantação e manejo das distintas áreas produtivas foram catalogadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Os usos da terra na agenda de mitigação das mudanças climáticas

O Acordo de Paris, firmado em 2015, na COP21, estabeleceu como meta ideal a contenção do aumento da média global de temperatura em 1,5 °C até o ano de 2100, tendo como base os níveis pré-industriais. Entretanto, apenas nove anos após a assinatura do referido tratado, as anomalias registradas apresentam indícios de que esse limite está próximo de ser suplantado (CANNON, 2025).

Em que pese as diferenças dos níveis históricos de emissão entre os países e, por consequência, suas heterogêneas parcelas de responsabilidade sobre a crise climática, os dois principais eixos dessa agenda – mitigação e adaptação – resultam em questões diferentes para cada sociedade. Dessa premissa, originou-se a ideia da criação de um mecanismo, denominado Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, do termo em Inglês), para pactuar compromissos de redução das emissões e promoção de estratégias adaptativas exequíveis em cada realidade, considerando que há uma abissal disparidade entre países. Brasil e Estados Unidos, por exemplo, respondem, respectivamente, por cerca de 2,4% e 11,1% das emissões globais (CRIPPA *et al.*, 2025).

Apesar de o Brasil ter menor participação do que China, EUA, União Europeia, Índia e Rússia, o país está entre as seis principais economias emissoras de GEE atualmente (CRIPPA *et al.*, 2025; SEEG, 2023). A principal fonte das emissões brasileiras resulta do conjunto de atividades relacionadas à mudança de uso da terra (46%) (sendo o desmatamento o maior vetor) e aos usos da terra, entre as quais se destaca a agropecuária (28%) (SEEG, 2023).

Este cenário retrata características importantes sobre a matriz produtiva do Brasil e indica que os sistemas de uso da terra predominantes são incompatíveis com a ambição de reverter o quadro de emissões nacionais para uma agenda efetiva de mitigação das mudanças do clima (SCOTT, 2018).

Nessa perspectiva, a agricultura convencional (nominada agronegócio) consolidou um modelo produtivo cuja geração de externalidades negativas reflete seu papel expressivo nas emissões (TORRES *et al.*, 2014; SEEG, 2023). Em consonância com esse debate de alta relevância nacional, o IPCC tem dedicado maior destaque ao papel dos usos da terra na crise climática (IPCC, 2023). Ao mesmo tempo em que este setor lidera emissões de países pouco industrializados, em cujas economias estão baseadas na produção de *commodities* agrícolas e minerais, de baixo valor agregado, cada vez mais se discute seu potencial inverso, de alavancar a captura de gás carbônico (CO₂). Nesse aspecto, a atividade agropecuária é estratégica quando executada mediante técnicas que favorecem a fixação de

C no solo em decorrência da decomposição de matéria orgânica (MO) e/ou de processos inorgânicos (TORRES et al., 2014).

Albrecht e Kandji (2003) afirmam que há duas principais formas em que a humanidade pode contribuir para a reversão da concentração de C na atmosfera: (1) Reduzir as emissões antropogênicas de CO₂; e (2) criar e/ou fortalecer sumidouros de C na biosfera. Estimativas calculam que o carbono na vegetação e nos solos representa duas vezes mais do que o que está acumulado na atmosfera (FUJISAKI et al., 2018). Esses autores apontam o potencial da agricultura de mobilizar C da atmosfera para seu armazenamento nos solos.

O Brasil desempenha um duplo papel, ambos relevantes na emissão e mitigação dos GEE, e vem estabelecendo normativas e legislações para tratar do tema. A Tabela 1 apresenta um resumo de algumas das principais leis elaboradas nos últimos 40 anos que contribuem para a mitigação das mudanças climáticas. Os conflitos de interesses em torno das preocupações relacionadas às distintas formas de uso dos recursos naturais permeou o processo histórico de estabelecimento dessas legislações ao longo dos anos. Ainda assim, elas refletem um horizonte de busca por sustentabilidade e justiça.

Tabela 1. Legislações estabelecidas no Brasil com fins de proteção do meio ambiente e que resultam em efeitos nas mudanças climáticas.

Lei	Objetivo
Lei nº 9.638/1981	Cria a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA)
Lei nº 9.985/2000	Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC).
Lei nº 12.187/2009	Instituiu a Política Nacional de Mudanças do Clima (PNMC).
Lei nº 12.114/2009	Estabeleceu o Fundo Nacional de Mudanças Climáticas
Lei nº 12.854/2013	Fomenta e incentiva ações que promovam a recuperação florestal e a implantação de sistemas agroflorestais
Lei nº 12.651/2012	Instituiu o Novo Código Florestal (modificou a lei nº 4.771/65).
Lei nº 14.119/2021	Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA).
Lei nº 15.042/2024	Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE)

Fonte: Modificado de Rocha (2024)

Theodoro e Barros (2011) sugerem que, ao longo desse tempo, as normas e suas regulamentações passaram de um modelo mais punitivo de comando e controle para um modelo mais alinhado com o envolvimento dos atores na busca de soluções, conhecido como beneficiário-recebedor, onde se valoriza a preservação em detrimento do pagamento de multas pelo uso indevido. Um exemplo dessa mudança pode ser observado no período de aprovação da Política Nacional de Meio Ambiente – PNMA (1981) e da Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais - PNPSA (2021). O instrumento legal mais recente, nessa perspectiva, é o Sistema Brasileiro de

Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa SBCE, que estabelece os princípios e a regulação para a comercialização de créditos de carbono, sejam eles voluntários ou regulados.

Além dos instrumentos normativos referentes às mudanças de uso da terra, a instituição do Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC⁺) é discutida por Oliveira (2023) frente às suas metas de incentivo à redução das emissões por meio de tecnologias agropecuárias (Figura 1).

Figura 1. Metas e mitigação do Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC⁺)

METAS ABC+ e Mitigação 2021 a 2030			
TECNOLOGIAS		META milhões ha ⁽¹⁾ /m ³ (2)/animais ⁽³⁾	META MITIGAÇÃO milhões Mg CO2 eq
Práticas para Recuperação de Pastagens Degradadas (PRPD) 		30,0 ⁽¹⁾	113,7
Sistema Plantio Direto (SPD)	Sistema Plantio Direto de Grãos (SPDG) 	12,5 ⁽¹⁾	12,1
	Sistema Plantio Direto Hortalças (SPDH) 	0,08 ⁽¹⁾	0,88
Sistemas de Integração (SIN)	Integração Lavoura- Pecuária- Floresta (ILPF) 	10,0 ⁽¹⁾	34,1
	Sistemas Agroflorestais (SAF) 	0,1 ⁽¹⁾	37,9
Florestas Plantadas (FP) 		4,0 ⁽¹⁾	510,0
Bioinsumos (BI) 		13,0 ⁽¹⁾	23,4
Sistemas Irrigados (SI) 		3,0 ⁽¹⁾	50,0
Manejo de Resíduos da Produção Animal (MRPA) 		208,4 ⁽²⁾	277,8
Terminação Intensiva (TI) 		5,0 ⁽³⁾	16,24
TOTAL ABC+		72,68 milhões ha + 208,40 milhões m³ + 5 milhões de animais	1.076,14 milhões de Mg CO2eq

Fonte: PLANO ABC+ (Brasil, 2021)

No contexto do Plano ABC⁺, os SAF são classificados como uma *tecnologia agropecuária* com elevado potencial de mitigação das mudanças climáticas. Em outras palavras, um “conjunto de técnicas e práticas agrícolas sustentáveis que visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor” (BRASIL, 2021). Percebe-se que a meta institucional vigente para o período de 2021 a 2030 objetiva a expansão de SAF em apenas 0,1 milhões/ha. Comparativamente, a meta de expansão dos sistemas ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta) é significativamente maior (10 milhões/ha), ainda que estes sistemas apresentem menor potencial de mitigação (34,1 milhões Mg CO2 equivalente, comparado à 37,9 milhões Mg CO2 equivalente dos SAF).

Assim sendo, para aprofundar a discussão em torno das contribuições e particularidades dos SAF diante das mudanças climáticas – objeto do presente estudo – é necessário proceder com o contexto histórico da emergência do agronegócio brasileiro e para compreender sua influência sobre o modo de produção que evoluiu em escala industrial e se tornou hegemônico.

2.2 O modelo agroindustrial de monocultivos no Brasil

A partir da década de 1960, a Revolução Verde incorporou inovações tecnológicas que promoveram a “modernização conservadora” do campo; um processo de integração técnica da indústria com a agricultura, preservando a prioridade sobre os territórios e o capital comercial às velhas oligarquias rurais (DELGADO, 2001). Esse projeto fez avançar uma política mundial de sujeição das terras agricultáveis para a exportação de *commodities*, sobretudo em países do Sul Global (SUAREZ, GWOZDZ, 2023; PORTO, SOARES, 2012), promovendo o uso de insumos sintéticos (fertilizantes e pesticidas), material genético manipulado pelas demandas de mercado, mecanização intensiva, padronização e especialização dos procedimentos (LIN et. al. 2008; ANDRADE, 2019). À medida que as áreas cultivadas se expandiram, a cobertura florestal retraiu.

Cabe ressaltar que, ao abrir os caminhos ao recém-conceituado agronegócio, o fomento estatal não foi coadjuvante, mas protagonista na construção da hegemonia deste sistema produtivo no Brasil (MATOS, PESSOA, 2011; PORTO, SOARES, 2012, ROMEIRO, 1998).

Um dos efeitos da inserção da agricultura nessa lógica capitalista de mercado é a priorização da eficiência escalar, na qual a produtividade do trabalho e a produtividade da terra são as principais variáveis para as estratégias de tomada de decisão quanto ao modelo produtivo (MATOS, PESSOA, 2011; LINI, 2024). Assim, orientados sob a ambição de que a maximização dos recursos incorra em maximização dos lucros (MATOS, PESSOA, 2011) os empreendimentos são pressionados por uma busca incessante de se poupar trabalho e baratear os custos (op. cit).

O modelo agroindustrial adotado almeja a produção em massa, a hiperespecialização e a padronização dos processos na agricultura (ANDRADE, 2019), tal como operam as fábricas. No entanto, essas características são contraditórias com a multifuncionalidade ontológica dos agroecossistemas. Por se tratar de ambientes complexos, em cujos meios de produção são sistemas vivos (como o solo e a vegetação), as premissas aplicadas nos ambientes controlados (como as fábricas) não preconizam, por exemplo, a manutenção dos serviços ecossistêmicos como função inerente da atividade. A incompatibilidade entre os princípios da industrialização e a realidade dos agroecossistemas é o que impulsionou a configuração atual da agricultura dita moderna.

É nesse contexto que a simplificação dos agroecossistemas e de suas respectivas operações se materializam de maneira mais evidente nas monoculturas. Ao cultivar apenas uma espécie, os tratos culturais se limitam à relativa previsibilidade dos ciclos fenológicos e intempéries que afetam aquele organismo em particular, eliminando fatores que incidem sobre outras espécies e agregam complexidade (LEMAIRE ET AL., 2015; SUAREZ, GWOZDZ, 2023).

Ao longo da evolução deste setor, o Brasil se tornou líder mundial no uso, consumo e importação de agrotóxicos (FAOSTAT, 2023) e o quarto maior importador de fertilizantes solúveis (THEODORO et al, 2022). Assim, a agropecuária do país consolidou um modelo de elevada dependência de recursos externos para o sustento da atividade. Também se tornou protagonista em índices de desmatamento, gerando externalidades negativas em escala inédita, que afetam a conservação dos recursos naturais necessários para salvaguardar o clima e a própria reprodução da atividade no longo prazo (SUAREZ, GWOZDZ, 2023).

2.3 A matéria orgânica (MO) e as mudanças do clima

Quando uma lavoura é implantada sobre uma área recém-desmatada, esta usufrui inicialmente do legado constituído nos ciclos metabólicos que a antecederam. Nutrientes, matéria orgânica (MO) e comunidades de micro e macro-organismos do solo, acumulados em sua estrutura, a beneficiarão (GOMES et al, 2020). Todavia, o emprego de práticas não conservacionistas compromete a manutenção desse reservatório (BARNOSKY et al., 2011; GANZENMULLER et al., 2025). Entre essas práticas, pode-se destacar o uso do fogo para iniciar o processo de desmate da vegetação e a subsequente supressão de espécies arbóreas e da biodiversidade de forma geral, instalando em seu lugar monocultivos; a remoção da serrapilheira que cobre os solos; o revolvimento excessivo dos solos; a intensa utilização de máquinas com grande utilização de energia não-renovável; a utilização intensiva de fertilizantes solúveis e o uso de agrotóxicos nocivos para a fauna edáfica (PRIMAVESI, 2002; SUAREZ, GWOZDZ, 2023; ANDRADE, 2019).

Esse conjunto de ações é característico do manejo convencional e compromete a oferta de alimentos e nichos ecológicos de residência para a microbiota. Como resultado, esse processo desfavorece a reposição da MO e os ciclos biogeoquímicos do carbono, necessários para a prestação de uma série de serviços ecossistêmicos, como a própria produção de alimentos e a produção de biomassa (SUAREZ, GWOZDZ, 2023; ANDRADE, 2019).

Assim, o manejo convencional compromete a capacidade do solo de estocar C e promove agroecossistemas com tendência ao declínio de COS (GANZENMULLER et al 2025). Há, neste processo, uma cisão entre a atividade humana e o fluxo natural dos ecossistemas de gerar sucessão ecológica de espécies por meio de uma biodiversidade funcional que acumula e complexifica a energia disponível (PASINI, 2017).

Dialogando com essa análise, Ganzenmuller et al (2025) investigaram o estoque atual do carbono na vegetação e nos solos e discutem que o mesmo se encontra em níveis 24% inferiores (344 PgC) comparado a cenários onde há baixa interferência humana.

Segundo esses autores, os principais vetores de perda de C do solo e da vegetação são as práticas de manejo empregadas no uso da terra e a mudança de cobertura da terra (da sigla em inglês, LULCCS - *Land Use and Land Cover Changes*). Em ordem de grandeza: a expansão de pastos (30%), a expansão da fronteira agrícola (24%) e manejo de florestas (23%; neste quesito considera-se extração de madeira, florestas plantadas em monocultura e mesmo agrofloresta). Áreas urbanas respondem por 3% e as florestas naturais, que não são LULCCs, representam os 20% remanescentes.

Os mesmos autores afirmam, ainda, que o uso da terra e as mudanças de cobertura da terra passaram a responder por 1/3 das emissões de GEE concomitante ao período em que se iniciou a tendência de elevação do padrão das emissões, em meados de 1850, provocando a migração de C dos estoques terrestres para a atmosfera.

Esse estudo também mostra que o Brasil está entre os principais países onde essas taxas são deficitárias. Os autores discutem que a perda do C da vegetação é maior em regiões tropicais fora das florestas úmidas – como é o caso do Cerrado – e nas regiões temperadas. Tal cenário está em sintonia com os dados do Observatório do Clima (2023) que evidenciam a magnitude do desmatamento no Brasil, com especial destaque para o aumento em 23% no bioma Cerrado, onde a conversão de uso da terra atrelada a episódios de queimadas que tem se intensificado.

Para além da perda de COS, os monocultivos em larga escala tem sido, historicamente, vetores de erosão dos solos em proporções inéditas (TOLLEFSON, 2010). Segundo a FAO (2014) cerca de 25 a 40 bilhões de toneladas de solos são lixiviados anualmente. Esse elevado potencial erosivo é uma das consequências da desestruturação resultantes das práticas não conservacionistas elencadas.

Enquanto a gênese dos solos ocorre em uma escala temporal de milhares de anos, já que resulta de sucessivos ciclos de metabolização, mineralização e estabilização de matéria orgânica e é dependente de fatores como clima, composição das rochas, entre outros, sua degradação pode ocorrer em uma escala temporal muito estreita, em questão de décadas (WEZEL et al 2009).

A erosão, como uma externalidade negativa dos modelos hegemônicos de produção, expõe a gravidade de seus efeitos colaterais. Muito além do aglomerado de areia, silte e argila, perde-se uma complexa rede de microrganismos, minerais e matéria orgânica acumulada através dos séculos. Prejuízos nos aspectos físicos dos solos, entre eles a densidade, porosidade e estabilidade de seus agregados são parte das consequências (CHUCHMANN et al., 2020; MENDES, 2020). Esses impactos afetam a capacidade de retenção de umidade no solo, o que significa um problema do ponto de vista da adaptação às mudanças climáticas, haja vista que os eventos extremos exigirão maior resiliência às secas.

Considerando todas essas adversidades, para assegurar propostas de NDCs coerentes com a realidade das emissões brasileiras é necessário partir das seguintes premissas: (i) a expansão da fronteira agrícola associada à conversão de vegetações nativas é fonte direta e massiva das emissões (com destacada relevância do uso do fogo como instrumento de desmatamento) e (ii) os sistemas agropecuários tem agravado a perda de estoques de C no solo por meio da perpetuação de manejos não-conservacionistas.

Tais fatos resultam em consequências para a desestabilização do clima sobre o regime e distribuição das chuvas, as oscilações de temperatura e demais fatores que alteram os ciclos produtivos e a vegetação. Estes resultados já são visíveis e afetam safras, como as do café, e implicam em queda na qualidade e disponibilidade dos produtos (IPCC, 2019).

Neste sentido, o Brasil destaca-se devido à profusão de experiências em sistemas agroecológicos de produção, como os Sistemas Agroflorestais (SAF), em suas diversas categorias.

2.4. Sistemas agroflorestais (SAF)

Tendo em vista a relação conflagrada, de antagonismo entre a agropecuária e a floresta no Brasil, na qual o avanço da primeira tem ocorrido suprimindo a segunda (SEEG, 2023), os sistemas de uso da terra e as tendências refletidas em suas mudanças posicionam ambos os contextos em extremos simbólicos. Entretanto, como visto anteriormente, essa lógica não se aplica à cosmovisão e as formas em que se expressam a ação antrópica de muitos povos originários (STEENBOCK et al 2021; PENNEREIRO, 1999).

Desde o seu surgimento, o termo "Agrofloresta" é empregado para nomear sistemas produtivos que abrangem um espectro de heterogeneidade vastíssimo. Esse espectro pode variar desde contextos de elevada complexidade ecológica, mais próximos do conceito de "floresta", até situações de simplificação acentuada, que se alinham mais intimamente com o componente "agro" (TORQUEBIAU, 2000).

À medida em que a crise climática é agravada e as sociedades executam suas *ideias para adiar o fim do mundo*², diversas taxonomias foram e estão sendo elaboradas em trabalhos científicos para discutir, sistematizar e aprofundar conhecimentos em torno dos Sistemas Agroflorestais (CARDINAEI 2018; KOUTIKA et al, 2021 et al, 2019; JACOBI et al 2025; MARTINELLI, 2020; TORQUEBIAU, 2000). Apesar da inexistência de uma descrição unânime, a mais reproduzida é a estabelecida em 1982 pelo ICRAF, que define:

²Alusão à obra do autor Ailton Krenak – *Ideias para adiar o fim do mundo*.

"A agrofloresta é um nome coletivo dado aos sistemas e práticas de uso da terra, no qual espécies perenes lenhosas são deliberadamente integradas com culturas e/ou animais na mesma unidade de manejo de terras. A integração pode ser tanto espacial quanto em sequência temporal. Normalmente, há interações ecológicas e econômicas entre os componentes madeireiros e não-madeireiros da agrofloresta" (Soares, 2018 apud ICRAF, 1993).

Nair et al (2010) afirmam que uma definição de Sistemas Agroflorestais com rigor científico deve destacar duas características que os diferem dos demais usos da terra. Quais sejam: (i) a intenção *deliberada* de integrar espécies perenes lenhosas na mesma unidade produtiva que culturas e/ou criação animal e (ii) a existência de interações significativas (positivas e/ou negativas) entre as espécies, seja ecológica e/ou economicamente.

Apesar desses contornos propostos para qualificar uma agrofloresta como tal, Torquebiau (2000) problematiza o sentido dado ao conjugar signos, em tese, distantes, como “agro” e “floresta”. Segundo o autor, ao contrário da aproximação que a conjugação indica, frequentemente as experiências nomeadas como SAF reforçam essas distâncias semânticas no campo. Em seu argumento, ele aponta que o contexto da consolidação inicial do termo Agrofloresta tinha como principal objetivo envolver comunidades rurais vizinhas de florestas tropicais, nas decisões que diziam respeito ao manejo florestal, combinando-o e associando-o à criação animal e à agricultura. Entretanto, a evolução do uso do conceito, segundo o autor, parece esvaziá-lo de um referencial “florestal” na medida em que elementos arbóreos e/ou perenes estão inseridos de maneira “espalhada, isolada, plantada em linhas, em camadas, agrupadas ou aglomeradas, raramente populações de árvores que se parecem florestas” (TORQUEBIAU, 2000). O autor questiona, por exemplo, por quê não utilizar outras nomenclaturas, como “arboricultura” ou “perenicultura”, ou “permacultura” para esses casos.

De outra perspectiva, Pasini (2017) contribui com essa discussão ao contextualizar ambiguidades que coexistem no âmbito do conceito *Sistema Agroflorestal*. Como exemplo, cita: consórcios com apenas duas espécies versus consórcios com elevado grau de biodiversidade; rotações simples de culturas; inserção do componente arbóreo em uma “sequência temporal” e não concomitante, como nos sistemas multiestratificados; uso de insumos sintéticos, inclusive pesticidas, em contraposição a sistemas com exclusivo aporte de insumos orgânicos, entre outros fatores.

Assim, ao mesmo tempo em que os Sistemas Agroflorestais são progressivamente reconhecidos por sua relevância em termos de associar produção com potencial de regeneração dos ecossistemas por meio de técnicas conservacionistas do solo, sua abrangência conceitual requer o complemento de outros termos para indicar a que arranjo se refere. A nomenclatura *Agrofloresta*

Sucessional, ou *Sucessional Análoga* (VAZ, 2002), por exemplo, surgiu para designar agroecossistemas baseados no método aplicado por Ernst Götsch (PENNEREIRO, 1999).

A despeito das divergências supracitadas, este uso da terra tem ganhado destaque internacional (CARDINAEL, 2018; KOUTIKA, 2023; ALBRECHT, KANDJI, 2003) e nacional (SOARES et al, 2022; TORRES et al 2014) por meio de trabalhos científicos consolidando evidências da relação positiva entre SAF e sequestro de COS e entre SAF e adaptação às mudanças climáticas por meio de melhorias no microclima, diversificação de renda e uso mais eficiente dos recursos hídricos (CARDINAEL, 2018).

O armazenamento de carbono no solo pode ocorrer por meio de duas vias: a direta, resultante de reações químicas inorgânicas entre compostos solúveis presentes no solo com H_2CO_3 ; e indireta, como no caso da acumulação de C na biomassa das plantas, mediada pela fotossíntese, posteriormente depositado no solo por meio da decomposição de MO (KOUTIKA, 2023; CARDINAEL et al., 2019). As agroflorestas melhoram o COS por meio da ciclagem da MO, ou seja, pelos processos indiretos do armazenamento de C. Como resultado, fortalecem a biocenose do solo (op. cit).

Os sistemas radiculares das árvores favorecem a relevante estocagem de COS em horizontes mais profundos do solo, pois promovem deposição de MO em camadas mais profundas (KOUTIKA, 2023; NAIR et al., 2010). Ao mesmo tempo, elevadas taxas de deposição de biomassa na superfície, por meio das folhas e galhos, também favorecem a produção de Carbono Orgânico Dissolvido (COD) solúvel, que pode ser transportado para as camadas mais profundas do subsolo, favorecendo a estocagem de C nesses horizontes (LORENZ, LAL, 2005; MA et al., 2020).

Acima da superfície, Soares et al (2022) demonstram que é possível verificar tendências de aumento gradativo de estoques de carbono na fitomassa viva de SAFs, a medida em que as árvores crescem e os sistemas são manejados por meio de poda. Os autores sugerem que é possível inferir que os valores relativos sejam influenciáveis pelas dinâmicas particulares de cada sistema.

O uso de espécies lenhosas fixadoras de nitrogênio (N) em SAF pode potencializar o estoque de COS por meio do fortalecimento da microbiota na serrapilheira e no solo, o que, por sua vez, otimiza a mineralização da serrapilheira, melhorando a ciclagem de C e a eficiência de sequestro de COS (BINI et al., 2012; PEREIRA et al., 2017). Além disso, Nygren et al. (2012) apontam que essas espécies, fornecem N prontamente disponível para culturas e indiretamente influenciam o sequestro de COS por meio das dinâmicas dos nódulos de suas raízes e a subsequente rizo-deposição de N (GRONINGEN et al., 2017). Entretanto, esses autores indicam que esses processos ainda são pouco investigados e é oportuno que pesquisas futuras possam se dedicar ao tema, haja vista os indícios relevantes já constatados.

Um aspecto menos explorado reside no fato de que a disponibilidade de madeira de forma perene nesses agroecossistemas também aporta outros benefícios indiretos no contexto das emissões. Por exemplo, o uso desse recurso como combustível, apesar de gerar um retorno imediato do C aprisionado na biomassa de volta para a atmosfera, estando associado a produção agrícola ou pecuária, apresenta-se como oportuno para o segmento, pois, em primeiro lugar, diminui a pressão sobre as florestas naturais para extração de recursos, em segundo, assegura produtividade do solo e, por último, reduz o uso de combustíveis fósseis (ALBRECHT, KANDJI, 2003).

Além de contribuir diretamente com a redução das emissões por meio da captura de C, os SAF contribuem indiretamente para a contenção do desmatamento. Considerando o seu potencial de promover a recuperação de solos degradados com manejo intensivo e ciclagem da MO e o aumento da produtividade por área em função da sobreposição de culturas, esses agroecossistemas são apontados como estratégicos para coibir uma fração do desmatamento que é responsável pela expansão da fronteira agrícola, motivada pela exaustão dos recursos naturais e improdutividade.

Sendo o desmatamento a fonte principal das emissões brasileira, seguido pelo uso da terra, os benefícios diretos e indiretos dos SAF parecem responder à altura da gravidade da questão. Por essas e outras razões, autores como Cardinael et al (2021), Torres et al. (2014) defendem sua relevância e papel preponderante na agenda de mitigação das mudanças climáticas.

Mas para além da eficiência de sequestro de carbono dos Sistemas Agroflorestais, existe uma série de benefícios quando se compara aos sistemas convencionais, entre os quais se pode citar: o aumento da estabilidade de agregados de solos (UDAWATTA et al., 2008, PRIMAVESI, 1998), que permite maior estabilização e proteção de C do solo, o aumento quantitativo e qualitativo da macrofauna edáfica, como as minhocas, em virtude da abundância de biomassa (KOUTIKA 2023, Apud HAUSER, 1993; PRICE, GORDON, 1998; CARDINAEL et al., 2019), essencial para a ciclagem de nutrientes, decomposição da serrapilheira e estabilização de COS.

Segundo esses autores, todas as categorias de SAF tem potencial para sequestrar C. Entretanto, aumentar o estoque de C em um dado período de tempo é apenas um passo (ALBRECHT, KANDJI 2003). O destino que esses estoques têm, ao longo do tempo é, de fato, o que determina seu potencial de armazenamento. Durante a implantação inicial, os SAF podem ser fonte emissora de GEE por meio da perda de C e N em processos como a roçada da vegetação, o revolvimento de solos e o aporte de insumos para adubação. Em seguida, decorre uma etapa de rápida acumulação e maturação do sistema que pode significar o aprisionamento de toneladas de C por meio dos galhos, brotos e raízes das árvores em desenvolvimento e no solo.

Nos denominados SAF Sequenciais, onde ao final de um ciclo de rotação as árvores são colhidas e substituídas por culturas agrícolas, parte significativa do C acumulado retorna para a atmosfera (ALBRECHT, KANDJI, 2003). Assim, nem todo agroecossistema classificado como SAF atende aos pressupostos que os qualifiquem positivamente em termos da mitigação das mudanças do clima por meio do estoque de C, como ressalta Terasaki Hart et al (2023).

Os autores elencaram algumas circunstâncias que qualificam Soluções Naturais Climáticas - Agroflorestais (SNC-Af). Em primeiro lugar está a condição de que as árvores do Sistema sejam intencionalmente plantadas ou mantidas, para que se configure o princípio de adicionalidade atribuído à mudança de uso da terra em questão. Em segundo lugar está a análise do contexto anterior à implantação do SAF, para avaliar se, de fato, a conversão do uso da terra para uma agrofloresta otimizou o armazenamento de C. De outro lado, a conversão de florestas nativas em SAF pode resultar em perda de C e, como consequência, aumento das emissões.

De acordo com Terasaki Hart et al. (2023) as estimativas em torno do custo-benefício dos SAF enquanto SNC os tornam a oportunidade agrícola mais vantajosa sob a perspectiva do potencial de mitigação dessas soluções, variando entre $0.12 \text{ Pg C ano}^{-1}$ (op. cit. GRISCOM et al. 2017; 95% de intervalo de confiança, 0.05 a $0.21 \text{ Pg C ano}^{-1}$) a $0.31 \text{ Pg C ano}^{-1}$ (TERASAKI HART et al, 2023 cit. ROE et al. 2021; incerteza não estimada). A título de comparação, os valores estimados para outras SNC relevantes, como Reflorestamento e Desmatamento Reduzido são, respectivamente $0.27 \text{ Pg C ano}^{-1}$ e $0.49 \text{ Pg C ano}^{-1}$ (KOUTIKA, 2023)

Portanto, verifica-se eficiência de sequestro apenas em contextos onde há um balanço positivo entre o gradiente de C estocado ao final de décadas comparado ao seu início. Assim, os autores defendem que a estocagem de C na biomassa só ocorre de maneira efetiva nos sistemas agroflorestais perenes, entre os quais destacam-se sistemas mais biodiversos e com maior densidade de árvores (CARDINAEEL 2018). Entre esses, pode-se destacar os SAF Sucessionais, que investem em uma estratégia de plantio e manejo das espécies arbóreas que asseguram ao longo do tempo e, especialmente, onde os tecidos lenhosos compõem proporções substanciais na biomassa total do agroecossistema. Uma vantagem comparativa desses sistemas em particular é o fato de que o potencial de sequestro de C não termina com a colheita de madeira.

2.5 Os Sistemas Agroflorestais Sucessionais (SAFS)

Os Sistemas Agroflorestais dirigidos pela sucessão natural, objeto de estudo do presente trabalho, têm como origem os pressupostos da Agricultura Sintrópica desenvolvida pelo agricultor e pesquisador Ernst Götsch, radicado no Brasil.

Ao vincular agrofloresta ao fenômeno natural da sucessão ecológica, Götsch (1995) estabelece bases para arranjos produtivos cujo sentido do manejo é criar dinâmicas que favoreçam a complexificação da energia, resultando no aumento da qualidade e quantidade de vida consolidada no ecossistema (Götsch, 1995). Dessa forma, os SAF Sucessionais (SAFS) buscam mimetizar a tendência de mudança de fitofisionomias e de populações que ocorre nos ambientes naturais ao longo do tempo e no espaço, como indica o exemplo da Figura 2. O processo sucessional de evolução dos ecossistemas acontece de forma que a composição de indivíduos é, por um lado, determinada por aqueles que a antecederam e, por outro, determinante dos que a sucederão (GÖTSCH, 1995). Ocorre em uma via dupla: os organismos se adaptam e alteram o ambiente onde se estabelecem e o ambiente, por sua vez, influencia os organismos em retrospecto (PENNEREIRO, 1999).

Ordenadas sob um nexos espacial e temporal que favoreça a otimização dos recursos naturais e, mesmo, que viabilize ambiência adequada a cada cultura (MICCOLIS et. al. 2016; STEENBOCK et al, 2021) as espécies são organizadas em uma lógica de sucessão de consórcios e de estratificação vertical da vegetação (JACOBI et al., 2025; VASCONCELOS, BELTRÃO, 2017). Por meio do manejo, dirigido por uma dinâmica de podas sistemática, a sobreposição de plantas herbáceas, arbustivas e arbóreas intensifica o uso da luz e intensifica a deposição de biomassa sobre o solo. Dessa forma, esses agroecossistemas têm potencial de aumentar o teor de matéria orgânica no solo (MOS) e de otimizar a atividade fotossintética, contribuindo para o armazenamento de COS (MEDEIROS et al, 2024; ALBERCHT, KANDJI, 2003).

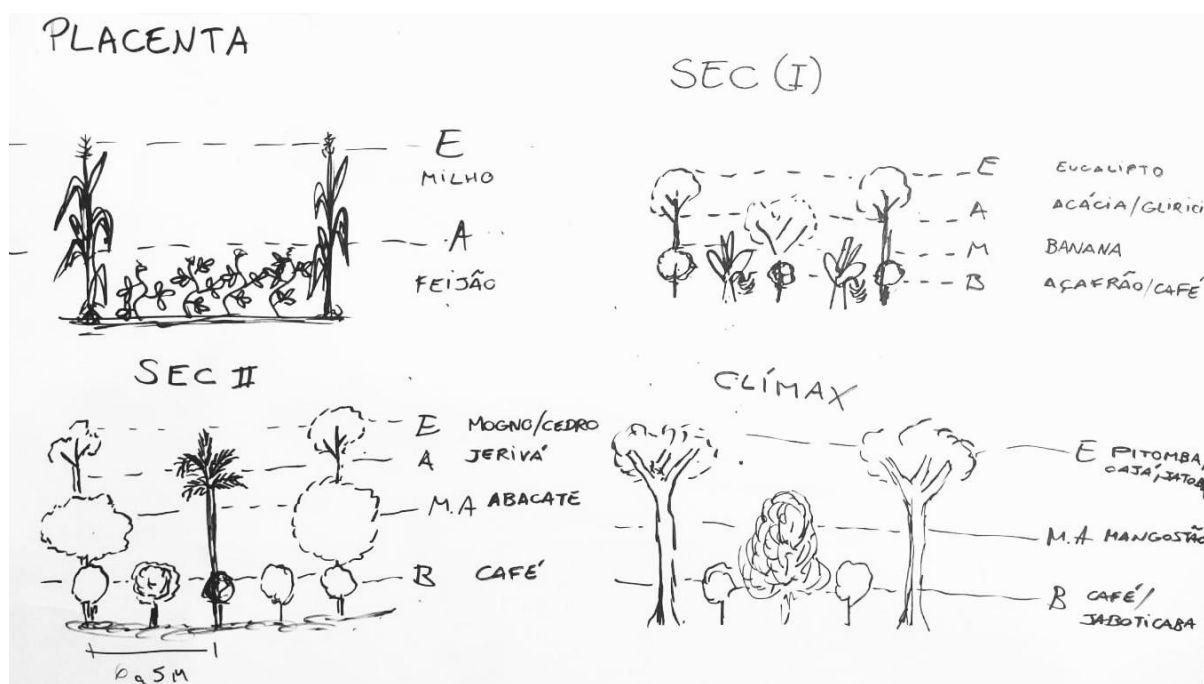


Figura 2: Representação da estratificação e dos consórcios dominantes nos ciclos da sucessão ecológica aplicados ao planejamento de um agroecossistema.

Assim, os SAF Sucessionais, conforme sistematizados por Götsch (1995) Penereiro (1999), Pasini (2017); Rebello, Sakamoto (2022) organizam o manejo como estratégia para acelerar a regeneração dos ecossistemas por meio do fluxo de transição de um estágio sucessional ao próximo. Cada etapa deste processo é constituída de um consórcio de espécies dominante; uma comunidade característica e protagonista em seu respectivo estágio sucessional. Assim, como parte da prerrogativa dos SAF Sucessionais, para que um agroecossistema atinja a etapa em que a comunidade do estágio clímax seja a dominante, a transição entre os processos anteriores terá ocorrido e, através dela, acumulado recursos necessários para a criação dos nichos ecológicos que viabilizam a existência de espécies mais exigentes (GÖTSCH, 1995; PENEREIRO, 1999).

O princípio da sucessão natural organiza a dimensão temporal e o sentido do avanço do agroecossistema ao longo dos ciclos. Em paralelo, a complexificação do ecossistema tende ao aumento da ocupação da vegetação nos estratos verticais da paisagem, na medida em que as árvores se desenvolvem. Assim, além de aplicar conhecimentos relativos ao estágio sucessional das plantas, o cultivo agroflorestal busca promover um melhor aproveitamento de recursos como a luz solar, por meio da sobreposição de plantas e do manejo que favoreça interações sinérgicas entre elas. Para isso, ao planejar os consórcios, aplica-se, também, conhecimentos relativos às demandas de luminosidade de cada espécie (JACOBI et al, 2025).

Dessa forma, os SAF Sucessionais promovem maior diversidade e densidade de espécies arbóreas, otimiza a atividade fotossintética em uma mesma unidade de área e, sob o manejo da estratificação por meio de podas sistemáticas, eleva o potencial de deposição de biomassa também diversificada e, sobretudo, rica em tecidos lenhosos, de maneira perene (GÖTSCH, 1995; PENEREIRO, 1999; REBELLO, SAKAMOTO, 2022; JACOBI et al, 2025). Por essa razão, essa categoria de SAF atende a alguns dos principais atributos que Albrecht e Kandji (2003) e Cardinael (2018) ressaltam como vetores de SAF com potencial mais elevado de contribuir para a mitigação das mudanças do clima por meio do estoque de carbono.

Jacobi et al. (2025) identificaram importantes características dessa categoria de SAF que as qualifica como uso da terra relevante e estratégico diante da mudanças climáticas e seus efeitos. Apesar de haver algumas divergências, conforme indicadas no trabalho de Pasini (2017), Jacobi et al (2025) equivalem *Sistemas de Agricultura Sintrópica* (SFS) aos Sistemas Agroflorestais Sucessionais (SAFS), fazendo referência à difusão de ambos estes conceitos por parte de comunidades praticantes

quando se referem ao conjunto de técnicas e princípios desses sistemas produtivos orientados para a acumulação da energia através da otimização da fotossíntese e manejo de biomassa.

No quesito agrobiodiversidade, que incorpora a ampla variedade de organismos integrados aos sistemas produtivos (de forma direta ou indireta), Jacobi et al (2025) verificaram conexões significativas entre este fator e a complexidade estrutural e temporal de um SAFS. Os autores apontaram que 89,7% das referências avaliadas demonstraram nexos existentes entre a combinação de elevada agrobiodiversidade; estratificação vertical e ampla diversidade funcional das espécies com uma ampla ocupação de nichos ecológicos. Esses aspectos têm um efeito importante para a evolução de espécies nativas e/ou de crescimento lento, pois, ao criar melhores condições para seu desenvolvimento, podem favorecer a taxa de sucesso do estabelecimento dessas espécies (op. cit). Este fato contrasta com as espécies vegetais de perfil mais generalistas, que emergem de forma proeminente em sistemas convencionais a pleno sol (como, por exemplo *Amaranthus viridis*), frequentemente associadas à maior rusticidade ou menor exigência em termos de nicho ecológico para que se estabeleçam (REBELLO, SAKAMOTO, 2022).

Em virtude deste potencial de incremento e conservação da biodiversidade na superfície, especialmente contribuindo para a evolução de espécies mais seletivas, ao mesmo tempo em que se produz alimentos e sequestra C, os SAF Sucessional podem estar no centro de discussões em torno de Soluções Naturais Climáticas.

Koutika et al (2023), identificaram que SAF mais complexos apresentam os melhores resultados do ponto de vista do potencial de armazenamento de C. Os autores defendem que um elemento-chave para compreender a correlação entre esses fatores (tipo de SAF e seu efeito sobre o solo) é, justamente, a densidade dos componentes arbóreos e o manejo baseado em podas, em cuja taxa de deposição de matéria orgânica diversificada e estruturalmente complexa se sobressai.

Em termos de mensuração da biomassa, dos estoques de carbono na superfície e no solo, 86,7% dos estudos avaliados por Jacobi et al (2025) indicaram resultados positivos para o incremento de COS em SAFS. Detectou-se um aumento ao longo do tempo ou em relação aos sistemas de referência (controle). Ademais, os dados indicaram um balanço positivo quanto às dinâmicas de estocagem de carbono e de nutrientes nos SAFS.

Os autores sugerem que este fato está especialmente associado à quantidade e qualidade da serrapilheira depositada nos SAFS. Esta apresentou teores equivalentes ou até 50% maior que nos contextos de Pousio, utilizados como referência (op. cit). Os autores enfatizam que este achado provavelmente resulta do aporte de tecidos lenhosos em elevadas proporções em SAFS. Em

contraposição, o material depositado naturalmente sobre áreas sem manejo de aceleração da sucessão natural, como no caso da área em pousio, a proporção de folhas é significativamente superior à de madeira.

Essa interpretação está em consonância com as evidências discutidas por Albrecht, Kandji (2003). A composição dos tecidos lenhosos apresenta elementos recalcitrantes, como lignina e outros polifenóis, em quantidades mais expressivas que nas folhas (op. cit). Assim, elementos de decomposição mais lenta geram precursores de MOS no conteúdo do solo superficial, e pode explicar o porquê dos solos em SAFS conterem maiores quantidades de COS comparado a sistemas em regeneração natural (áreas em pousio), bem como quantidades mais elevadas de humus que em monoculturas (op. cit).

De acordo com dados obtidos a partir da pesquisa de Schembergue et al (2017), há um interessante indicativo da adoção de SAFS no Brasil condicionada, principalmente, por questões socioeconômicas e climáticas a nível municipal. Os autores discutem que há também influência de fatores agronômicos, com relativa menor importância. Apontam que a escolha pela adoção de SAFs é, frequentemente, uma medida de adaptação às mudanças climáticas em regiões mais afetadas por alterações no padrão histórico de temperatura e precipitação das chuvas. Por outro lado, questões relacionadas ao acesso e propriedade da terra, o acesso a créditos e à assistência técnica dirigida para uma agricultura agroflorestal são evidenciados como determinantes - e, muitas vezes, limitantes - para a expansão destes sistemas produtivos (SCHEMBERGUE ET AL, 2017; MICCOLIS ET AL, 2017)

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização regional da área de pesquisa

O Núcleo Rural Lago Oeste (NRLO), onde estão situados os três agroecossistemas analisados (SAF, Mono e Pousio) (Figura 3), localiza-se a cerca de 40 km do centro de Brasília (DF), na Região Administrativa de Sobradinho II (Região Administrativa - RA V). Trata-se de um ambiente que se destaca por sua relevância ecológica pois está superposto a uma Área de Proteção de Manancial, responsável pela recarga de aquíferos que abastecem a capital (Greentec, 2010) e margeia o Parque Nacional de Brasília (PNB) - o maior remanescente de Cerrado do DF (ICMBIO, 2023), um bioma inserido entre os *hotspots* mundiais para a conservação da biodiversidade (KLINK; MACHADO, 2005).

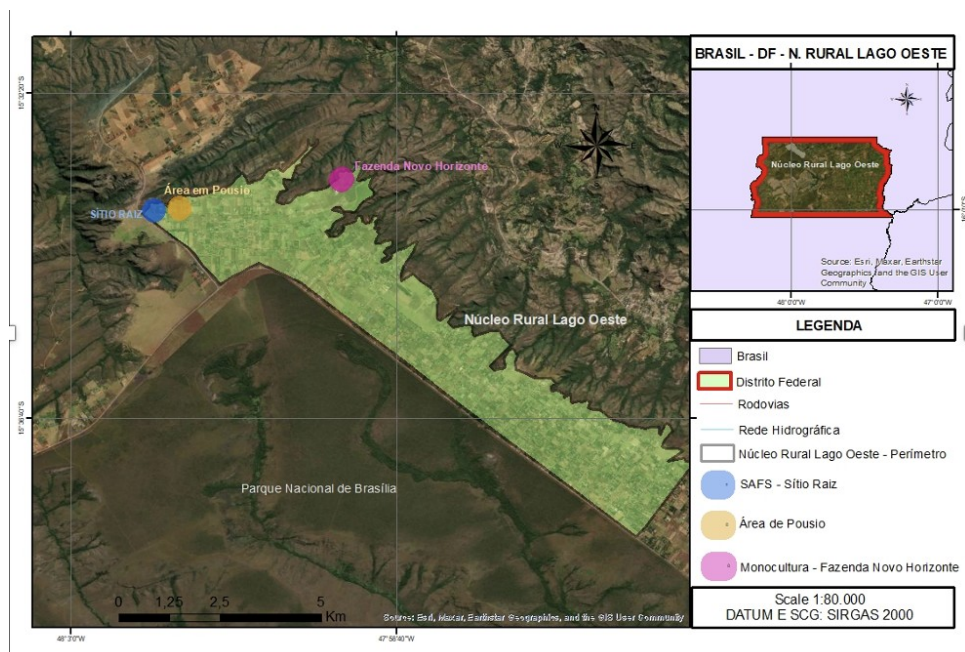


Figura 3. Mapa de localização das áreas da pesquisa e a inserção do Núcleo Rural Lago Oeste, Brasília (DF) no contexto regional.

Classificada como Zona Rural de Uso Controlado devido à sua condição de elevada sensibilidade ambiental, o NRLO concentra uma densidade expressiva de empreendimentos agroecológicos e de produção orgânica. Entre essas iniciativas está o Sítio Raíz, com um histórico de amplo alcance educativo por meio de visitas técnicas, cursos e oficinas sobre Sistemas Agroflorestais de Produção.

Os limites do NRLO estão inseridos na APA da Cafuringa e a APA do Planalto Central, ambas Áreas de Proteção Ambiental, que, por sua vez, são categorias menos restritivas. É neste contexto onde vive a efervescente e vanguardista comunidade de agricultoras/es e neorurais, em glebas predominantemente de dois hectares.

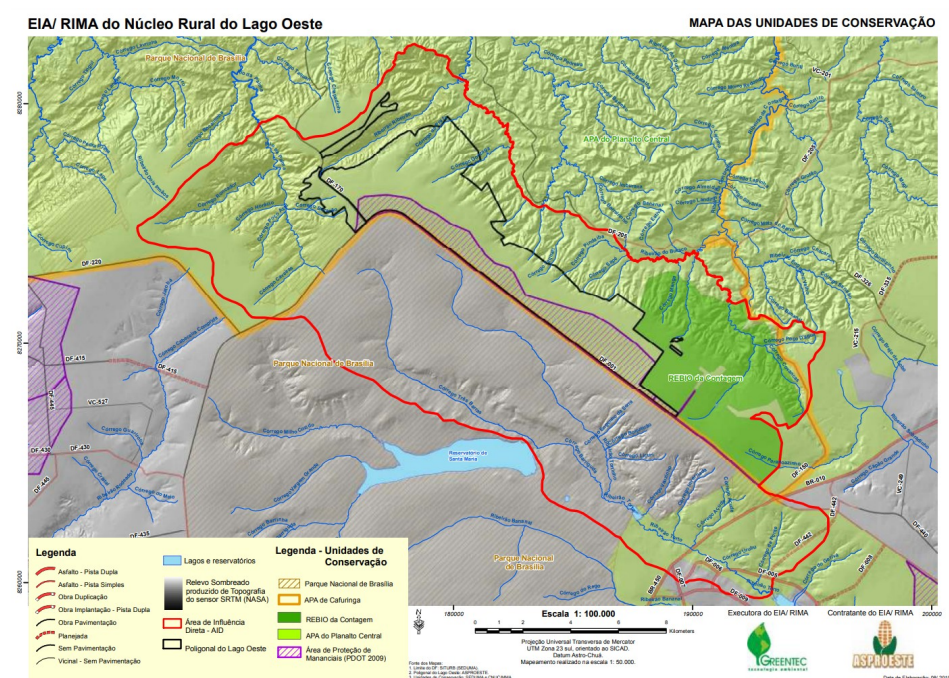


Figura 4. Mapa das Unidades de Conservação do Núcleo Rural Lago Oeste.

Fonte: GREENTEC, 2010 – Relatório de Impacto ao Meio Ambiente (RIMA) Núcleo Rural Lago Oeste

A região está situada a 1.250 m acima do nível do mar. O clima local corresponde a Aw (Tropical de Altitude), segundo a classificação de Koppen, com temperatura média anual em torno de 22 °C (GREENTEC, 2010). Como tal, é marcado por uma acentuada sazonalidade em que o período seco ocorre entre maio e setembro, concomitante à época mais fria do ano e com índices de pluviosidade nulos durante alguns meses (INMET, 2018) e o período chuvoso, que ocorre entre outubro e abril, com média anual de pluviosidade registrada pela estação Contagem (situada dentro do NRLO) de 1.639 mm (GREENTEC, 2010).

Sendo este o cenário regional onde estão inseridas as áreas amostradas na presente pesquisa, as particularidades de cada uma delas em termos de suas estratégias de manejo e histórico de implantação serão apresentadas adiante.

3.2. Amostragem e análise do solo

Para comparar os parâmetros edáficos de pH, CO, P e K das áreas, foram realizados amostragens de solos nos três agroecossistemas (SAF, Mono e Pousio) por meio da técnica de amostragem composta, realizada em quadrantes de 35 m de comprimento por 40 m de largura. O procedimento de coleta iniciou-se com a definição dos pontos de amostragem dentro dos quadrantes, seguido da remoção da camada herbácea e da serrapilheira, sucedida pela coleta da amostra na profundidade de 0-30 cm com auxílio de um trado de facas. Cada área foi analisada a partir de seis amostras compostas de solo, com quadrantes de coleta aleatoriamente distribuídos. Cada amostra composta foi formada pela mistura de solo de 6 subamostras, distribuídas a 2,5 m equidistantes, seguindo um caminhar em meia-lua, coletando subamostras tanto nas linhas de cultivo quanto nas entrelinhas. Foram realizadas seis amostragens aleatórias por área, onde cada amostra foi composta de seis subamostras, distribuídas a 2,5 m equidistantes, seguindo um desenho de meia-lua, captando solos nas linhas de cultivo e entrelinhas. A coleta das amostras ocorreu em dois períodos distintos: setembro de 2024 (estação seca, fase T1) e em novembro de 2024 (estação chuvosa, fase T2).

Posteriormente, as amostras foram homogeneizadas, secas ao ar e submetidas à tamisação em peneira de 2 mm MESH. Os teores disponíveis de P e K do solo foram extraídos com Mehlich-1 (0,05 mol L⁻¹ de HCl + 0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄ na relação solo:extrator 1:10 v/v) e determinados por espectrometria de absorção molecular com leitura no comprimento de onda de 725 nm (P) e por espectrometria de emissão de chama (K) (DONAGEMA et al., 2011). O pH do solo foi determinado

após extração da acidez ativa do solo com água destilada na relação 1:2,5 (v/v) (DONAGEMA et al., 2011).

Os teores de C orgânico do solo foram determinados de acordo com Yeomans, Bremner (1988). Para tanto, as amostras foram previamente moídas em almofariz de porcelana e uma alíquota de 0.250 g foi transferida para tubos de digestão onde receberam uma solução padronizada de $K_2Cr_2O_7$ (0.167 mol L^{-1}) e H_2SO_4 concentrado. Após a reação inicial, os tubos foram mantidos sob aquecimento adicional a 170°C por 30 minutos. A titulação do excedente de $K_2Cr_2O_7$ foi realizada com uma solução de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.167 mol L^{-1}) na presença de ácido orto-fosfórico.

3.3. Análise de Índice de Vegetação Ajustado pelo Solo Otimizado (OSAVI)

A densidade e vigor da vegetação de ambos os agroecossistemas de cafeicultura foi avaliada por meio do Índice de Vegetação Ajustado pelo Solo (OSAVI) gerado a partir do sobrevôo com VANT (DJI Phantom 4 Pro), equipado com Câmera Mapir Survey 3 RGB e Infravermelho, realizado em 19 de setembro de 2024. Foram aleatorizados cinco e seis quadrantes para as áreas de SAF e Mono, respectivamente, de acordo com o tamanho das áreas captadas por sensoriamento remoto. Dentro de cada quadrante foram aleatorizados 20 pontos, estes utilizados para amostragem do *raster* de cada cultivo, gerando 100 e 120 valores amostrais para SAFS e Monocultura, respectivamente, conforme Figura 5.

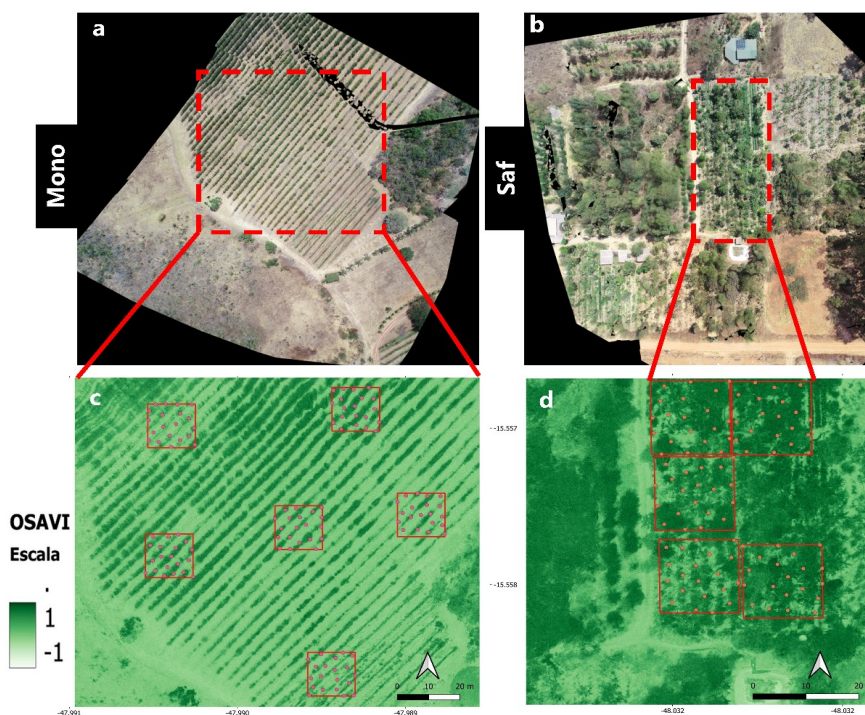


Figura 5. Área de sobrevôo do VANT sobre (a) Monocultivo - Mono e (b) Sistema Agroflorestal - SAF. OSAVI de Mono (c) e SAF (d). Limites em vermelho representam a área amostrada. Quadrantes em laranja representam as amostras, distribuídas aleatoriamente, com 100 valores gerados para SAF e 120 para Mono.

3.4. Análise estatística

Os dados foram testados para verificar a normalidade e submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando-se o modelo linear geral inteiramente casualizado, com aplicação de transformação quando necessário. As condições de normalidade dos resíduos, homogeneidade das variâncias e presença de *outliers* foram verificadas pelos testes de Jarque-Bera, Bartlett e ESD generalizado, respectivamente. As médias dos preditores avaliados foram comparadas entre si pelo teste Tukey a 5 % de erro tipo I familiar. As análises foram realizadas com auxílio do software *SPEED Stat* (CARVALHO et al., 2020).

4. DESCRIÇÃO DO MANEJO E DO HISTÓRICO DAS ÁREAS

4.1.1 Manejo agroflorestal – Sítio Raíz

O Sítio Raíz, que abriga a área denominada SAFS, é uma unidade de produção familiar que possui agroecossistemas de produção orgânica e biodiversa, inserida na categoria de empreendimento da agricultura familiar. A área de dois hectares produz hortaliças, culturas anuais e frutíferas desde 2013, em pequena escala, mas com manejo contínuo em policultivo.

As principais técnicas de manejo utilizadas na área de SAFS com café são: (i) adubação e remineralização no preparo de solos exclusivamente a partir de fontes permitidas na agricultura orgânica (esterco, pó de rocha, adubação verde); (ii) plantios consorciados e multiestratificados com alta densidade de árvores; (iii) manutenção da nutrição de plantas a partir de aplicação exclusiva de insumos permitidos pela agricultura orgânica; (iv) podas sistemáticas e deposição da matéria orgânica nos solos; (v) manejo de estratificação e manejo de sucessão ecológica das espécies; (vi) controle fitossanitário a partir de insumos permitidos na agricultura orgânica e; (vii) uso de sistemas de irrigação e fertirrigação.

A prioridade, na área amostrada, é a produção de café, abacate e banana em um arranjo florístico que consorcia indivíduos com alto potencial de prestação de serviços ecossistêmicos (como produção e deposição de biomassa com alto teor de lignina, crescimento vegetativo rápido, fixação de N, diversificação de nichos ecológicos, atração de polinizadores, entre outros) (JACOBI et al., 2025) e espécies de interesse econômico (incluindo, neste ponto, a produção de alimentos para o consumo). A diversidade das plantas atende aos princípios de sucessão ecológica da vegetação e de estratificação

da ocupação vertical da paisagem. A área de aproximadamente 1400 m² é composta por um total de 28 espécies de plantas, sendo 22 arbóreas e, entre elas, 17 comestíveis e 20 geradoras de produtos da sociobiodiversidade com valor de mercado. O cultivo de café neste sistema se dá de forma parcialmente sombreada, pois, apesar do efeito da copa das árvores dos estratos acima dos cafezeiros, há uma dinâmica de podas sistemáticas que altera a incidência de luz solar de maneira expressiva e promove constante deposição de matéria orgânica sobre o solo (Figura 4). As operações agrícolas referentes aos tratos culturais e colheita são realizadas manualmente, com mínima utilização de energia fóssil.



Figura 6. SAFS: Sistema Agroflorestal Sucessional com foco em cafeicultura do Sítio Raíz, 2024. Lago Oeste/DF

Essa estratégia de manejo foi estabelecida ao longo da pesquisa-ação constante do agricultor, objetivando, segundo o mesmo, aplicar os princípios da Agricultura Sintrópica para melhorar os parâmetros de fertilidade e saúde do agroecossistema, por meio de processos que diminuam a dependência dos insumos externos na atividade (GÖTSCH, 1995; REBELO, SAKAMOTO; 2022). Dessa forma, esse manejo de podas atende à finalidade de elevar o teor de MO no solo concomitante à produção de alimentos, otimizando o aproveitamento da luz solar e manejando as plantas para facilitar entrada de luz e execução dos tratos culturais pertinentes.

4.1.2. Histórico do Sítio Raiz

Entre 1980 e 1990 a área do sítio Raiz estava destinada ao cultivo de soja e milho em sistema de sequeiro. Em função do manejo convencional, associado à frequente exposição ao fogo, a área gradualmente perdeu aptidão para atividade agrícola e foi convertida em um pasto abandonado, de baixa produtividade e escassa regeneração, com predominância de capim *Andropogon gayanus* e

poucas árvores de Cerrado *sensu strictu*. Em que pese suas características constituintes, de um solo textura areno-argilosa, formado por um pacote de solos com horizonte A moderado, horizonte B latossólico distrófico, o perfil edáfico local se expressa como bem drenado e de acidez variando de moderada a forte, menos resiliente aos vetores de degradação (SOARES, 2018).

Em 2011 houve uma mudança de posseiro e o mesmo interrompeu a incidência de fogo na área. Quando o atual proprietário, o engenheiro agrônomo Rômulo Araújo, adquiriu o sítio, em 2013, foram feitas algumas avaliações que incluíram análises químico-físicas do solo, que confirmou sua condição de baixa fertilidade natural, com teor de pH em torno de 4,6.

Assim, conforme relatado pelo proprietário, no início do período chuvoso daquele ano, por volta de outubro, a primeira intervenção na área foi realizada para instalação de um cultivo de sequeiro de culturas anuais e adubação verde, partindo das premissas relacionadas ao aumento de ciclagem de MO. O pasto foi roçado para o aproveitamento da biomassa e houve aplicação de pó de rocha (biotita calcoxisto), da mineradora Mistel Ltda, termofosfato e esterco de aves para ativar um processo de remineralização do solo, recompondo micro e macronutrientes essenciais para a saúde da vegetação e da atividade agrícola (SOARES, 2018).

O primeiro cultivo nesta área foi de arroz e *Crotalaria sp.*, implantado em 50% da área disponível. Na outra metade, foi feito o plantio de milho consorciado com batata doce, *Crotalaria sp.* e *Tithonia diversifolia* semeados à lanço. Segundo informações do proprietário, a colheita deste primeiro cultivo superou expectativas, gerando renda e fortalecendo a segurança alimentar para a família. Entre abril de 2014 e novembro de 2015 a área ficou em pousio, com crotalária e margaridão (*Tithonia diversifolia*) estabelecidas para ativar fixação de N e favorecer processos biológicos (NYGREN, 2012) enquanto o agricultor manjava outras áreas. Após esse período foi dado início à implantação do SAFS. Devido à limitação financeira para investimento e à importância econômica da horticultura para a família, a estratégia adotada foi a de estabelecer o SAFS de maneira parcial e com menor densidade de espécies arbóreas inicialmente.

Após um cronograma de inserção de espécies, manejos e testes com diferentes consórcios, em 2015 o SAFS começou a ser implementado associado ao cultivo de hortaliças de ciclo curto e mais exigentes em absorção de macro e micronutrientes (como brócolis, repolho, couve, agrião e morango) e de ciclo longo, como a mandioca para dar sequência na sucessão ecológica das espécies. Nesse contexto, foi aplicado esterco aviário, termofosfato e calcário em área total nos canteiros.

Apenas em 2017 a área passou a se caracterizar como um sistema dedicado à cafeicultura agroflorestal, atingindo a meta aproximada para uma densidade de 3.500 a 4000 pés de café por

hectare, em um espaçamento de 1,2m entre cafezeiros na mesma linha e 2,25m entre linhas, associada à produção de banana-prata e abacate de variedades precoces e tardias, entre muitas outras espécies arbóreas que foram sendo introduzidas na medida em que a família coletava sementes e/ou comprava mudas.

4.2.1. Manejo convencional – Fazenda Novo Horizonte

A Fazenda Novo Horizonte está estabelecida na região desde 1988, época em que o proprietário criava gado. Trata-se de uma unidade produtiva empresarial. A cafeicultura iniciou-se a partir de 2003, adotando as técnicas de agricultura convencional, com sistema em monocultivo. O estabelecimento possui área total de 280 ha, sendo que, aproximadamente, 40 ha são destinados à cafeicultura e cerca de 200 ha são área de reserva ambiental, segundo o proprietário.



Figura 7. Amostragem de solo na área de café em sistema de monocultivo – Fazenda Novo Horizonte, 2024. Lago Oeste/DF

O cultivo de café é realizado a pleno sol e as operações de tratos culturais e colheitas são mecanizadas. O espaçamento entre as plantas é de 3,8 m entre as linhas e 0,7 m entre plantas na maior parte das áreas. Entretanto, nas áreas mais recentes, como a área amostrada, optou-se por adensar o plantio um pouco mais, e o espaçamento entre plantas foi alterado para 0,5 m. O objetivo da fazenda é aumentar a produtividade dos cafés, garantindo a manutenção da qualidade do produto, cuja exportação é o principal mercado.

A estratégia de adubação das áreas se dá por meio do aporte nos solos de ureia, sulfato de amônio e nitrato de cálcio, em média, 3-4 vezes por ciclo. Há, também, aplicação anual de NPK. Além do aporte nos solos, a adubação foliar ocorre mensalmente, sendo interrompida durante o período das colheitas, de julho a agosto, para suplementar B, Mn, Mg, P. Além da adubação com fertilizantes

convencionais (com suas cadeias de produção e distribuição energeticamente dispendiosas), o senhor Coutinho também faz uso de esterco aviário anualmente, no início das chuvas, na dose de 5 t ha⁻¹. Segundo o produtor, a aplicação deste insumo tem a função de aportar N, mas também P e elevar a MO do solo.

Sob influência das tendências de mercado no nicho dos *cafés especiais*, a adoção de alguns princípios conservacionistas se tornam ativos relevantes para a produção e comercialização dos cafés da fazenda. Paralelamente, em busca de melhorar o aporte de MO nos solos, algumas práticas foram implementadas ao longo dos anos, como a reciclagem das cascas dos cafés beneficiados, que passaram a ser depositadas nas áreas de produção, sobre as entrelinhas e saias dos cafés. Segundo o produtor, o volume médio desse aporte se dá em torno de 1,5 t ha⁻¹.

4.2.2 – Histórico da Fazenda Novo Horizonte

Segundo o proprietário, o avanço da discussão sobre agricultura regenerativa o convenceu a incorporar certas práticas com o objetivo de ampliar a produção de biomassa e deposição de MO nos solos como estratégia de melhorar as condições edáficas no médio-longo prazo. Ele afirma que transicionou de um método inicial onde a recomendação dos agrônomos era pulverizar herbicida para eliminar o capim (*Brachiaria decumbens*) e demais ervas espontâneas da área (nas entrelinhas do café e embaixo da copa do café, o que popularmente chama-se “saia” do café) para um método de corte e aproveitamento da biomassa dessa vegetação.

Por cerca de 15 anos, utilizou um implemento agrícola – a Trincha – que tritura e distribui a palhada, em média, 2 vezes ao ano, deixando-a sobre o solo, nas entrelinhas do café. Assim, o uso de herbicida passou a acontecer de forma mais restrita, na saia do café. Buscando melhorar os teores de MO no solo, nos últimos anos o senhor Coutinho adotou a substituição da Trincha para uma Roçadeira, uma vez que este implemento permite roçar a palhada e acumulá-la na saia do café. O benefício dessa substituição, de acordo com o produtor, é que a retirada da palhada das entrelinhas, onde ficava depositada sobre as touceiras roçadas do capim recém-cortado, faz com que este rebrote mais rapidamente. Dessa forma, foi possível aumentar a frequência de roçagem para 3-4 vezes anualmente e aumentar a oferta de MO na área produtiva.

Até o ano de 2022, a calagem era uma prática realizada na Fazenda Horizonte, em média, uma vez anualmente ou a cada dois anos. Segundo o produtor, nos últimos três anos ele tem evitado a calagem nessa constância porque a elevação do teor de pH tem afetado a produção de café. Entretanto, o uso sistemático de ureia e sulfato de amônio como fontes de nitrogênio tende a acidificar o teor de

pH dos solos, conforme relata o produtor. A área amostrada foi implantada em 2015, possui uma leve declividade e é irrigada por gotejamento desde sua instalação.

4.3 Área em Pousio

A área em Pousio representa um ambiente que pode ser considerado como controle da análise comparativa, onde não há manejo há, aproximadamente, duas décadas, de acordo com a memória dos moradores da região. A área pertence à União e está situada entre duas chácaras habitadas por seus respectivos posseiros. É constituída por uma vegetação de cerrado *senso strictu* em processo de regeneração natural (Figura 6). Há predominância de capins, como *Andropogon gayanus* e *Echinoleana inflexa* e arbustos como *Baccharis dracunculifolia* e algumas árvores nativas que crescem em ritmo lento, conforme relatam os moradores. A área foi escolhida para fins comparativos entre os dois diferentes tratamentos considerando o uso e ocupação do solo, sua proximidade geográfica e relativa semelhança com as condições pré-existentes aos dois outros agroecossistemas analisados.



Figura 8. Área em pousio, 2024. Lago Oeste/DF

5. Resultados

5.1. Riqueza de espécies vegetais e diversidade funcional nos agroecossistemas

A partir dos dados obtidos nas entrevistas com os proprietários, foi possível averiguar a diversidade de plantas nos três contextos (SAFS; Mono e Pousio) (Tabela 2). Para padronizar a riqueza das espécies perenes encontradas em SAFS e em Pousio, foram apenas registrados indivíduos arbóreos com porte acima de 1,60 m. Os cafés foram contabilizados em sua totalidade e as touceiras de bananeiras contabilizadas como 1 indivíduo.

Qtde.	SAFS	Qtde.	MONOCULTIVO	Qtde	POUSIO
-	Cará roxo (<i>Dioscorea trifida</i>)	-	Capim Braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>)	-	Capim flechinha (<i>Echinoleana inflexa</i>)
-	Inhame (<i>Dioscorea villosa</i>)	526	Café (<i>Coffea arabica</i>)	-	Capim Andropogon (<i>Andropogon gayanus</i>)
-	Taioba (<i>Xathosoma agittifolium</i>)			4	Alecrim do campo (<i>Baccharis dracunculifolia</i>)
-	Cúrcuma (<i>Curcuma longa</i>)			6	Pau-terra (<i>Qualea parviflora</i>)
-	Capim Mombaça (<i>Panicum maximum</i>)			1	Carvoeiro (<i>Sclerolobium paniculatum Vogel</i>)
450	Café (<i>Coffea arabica</i>)			2	Vassoura-de-bruxa (<i>Ouratea hexasperma</i>)
2	Jatobá (<i>Hymenaea courbaril</i>)			1	Pequi (<i>Caryocar brasiliense</i>)
1	Copaíba (<i>Copaifera langsdorffii</i>)			1	Mata Pasto (<i>Senna rugosa</i>)
13	Aroeira (<i>Myracrodruon urundeuva</i>)			1	<i>Banisteriopsis coriacea</i>
4	Jaracatiá (<i>Jaracatia spinosa</i>)			2	Murici-do-Cerrado (<i>Byrsonima coccolobifolia</i>)
2	Mutamba (<i>Guazuma ulmifolia</i>)			1	Tamanqueiro (<i>Aegiphilla verticilata</i>)
13	Mogno Africano (<i>Khaya ivorensis</i>)			1	Peroba-do-Cerrado (<i>Aspidosperma tomentosum</i>)
7	Eucalipto (<i>Eucalyptus sp</i>)			3	Carne-de-Vaca (<i>Roupala montana</i>)
90	Banana (<i>Musa paradisiaca</i>)			3	Chapéu de Couro (<i>Palicourea rigida</i>)
1	Macadâmia (<i>Macadamia integrifolia</i>)			1	Mandiocão do Cerrado (<i>Schefflera macrocarpa</i>)
6	Gliricídea (<i>Gliricidia sepium</i>)			6	Marmelo-do-campo (<i>Plenkia populnea</i>)
9	Abacate (<i>Persea americana</i>)			-	Gabiroba (<i>Campomanesia adamantium</i>)
7	Manga (<i>Mangifera indica</i>)			3	Grão-de-galo (<i>Pouteria torta</i>)
1	Cajá mirim (<i>Spondias mombin</i>)			1	Ipê-do-Cerrado (<i>Handroanthus ochraceus</i>)
1	Ipe-roxo (<i>Handroanthus impetiginosus</i>)			2	Araticum (<i>Annona montana</i>)
1	Landim (<i>Calophyllum brasiliense</i>)			3	Angelim (<i>Andira vermifuga</i>)
11	Jenipapo (<i>Genipa americana</i>)				
5	Pau Rei (<i>Pterygota brasiliensis</i>)				
11	Gonçalo Alves (<i>Astronium fraxinifolium</i>)				
11	Pitanga (<i>Eugenia uniflora</i>)				
8	Amora (<i>Morus nigra</i>)				
8	Leucena (<i>Leucaena leucocephala</i>)				
5	Laranja Cristal (<i>Citrus sinensis</i>)				
1	Canafistula (<i>Peltophorum dubium</i>)				
22	Junteira (<i>Trichanthera</i>				

Tabela 2: Levantamento de espécies e quantificação dos indivíduos perenes (arbóreos apenas com >1,6m) em SAFS, Monocultivo e Pousio. *Nomenclatura em verde designa espécies perenes lenhosas e bananeiras.

A sistematização dos dados da tabela permite caracterizar a composição florística das áreas, evidenciando a riqueza de espécies e a densidade de plantas perenes, como árvores, cafeeiros e bananeiras. O Sistema Agroflorestal Sucessional registrou a maior diversidade, com 30 espécies consorciadas, sendo 25 perenes. Em contraste, o sistema de monocultivo apresentou apenas duas espécies, sendo uma perene (*Coffea arabica*), enquanto a área em pousio abrigou 21 espécies, incluindo 18 perenes. Este levantamento fundamenta a análise da correlação entre riqueza de espécies e prestação de serviços ecossistêmicos como deposição de biomassa no solo e suprimento de recursos, sejam eles alimentícios, madeireiros e/ou medicinais, generalizados sob a categoria “potencial de uso econômico”, conforme figura 9.

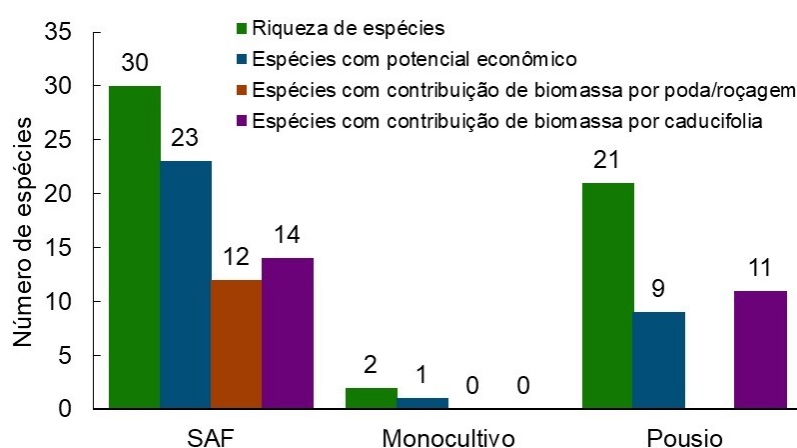


Figura 9. Riqueza de espécies vegetais e funcionalidade em termos de potencial econômico e de deposição de biomassa em SAF, Monocultivo e Pousio.

Quanto à funcionalidade atribuída à diversidade, no SAFS foram identificadas 23 espécies com potencial econômico, 12 que contribuem para a deposição em maior volume de biomassa por meio de podas ou roçagem³, e 14 que o fazem através da caducifolia. Já no monocultivo, verificou-se apenas uma espécie com valor econômico (*Coffea arabica*) e uma que contribui com biomassa via roçagem (*Brachiaria decumbens*), não havendo espécies caducifólias. Na área de pousio, observaram-se nove espécies com potencial econômico (como *Caryocar brasiliense*, *Baccharis dracunculifolia*, *Andira vermifuga*, *Annona montana*, entre outras), nenhuma que contribui com biomassa via poda - devido à ausência de manejo - e onze que o fazem por meio do comportamento d e caducifolia.

³ Entre as 12 espécies que contribuem com biomassa através do manejo, 11 são arbóreas e 1 é gramínea (*Panicum maximum*), que, por sua vez, é manejada através de roçagem.

A Figura 10 mostra a distribuição da quantidade total de indivíduos no SAFS e em Monocultivo considerando o estrato de suas respectivas espécies, conforme categorizados nas entrevistas.

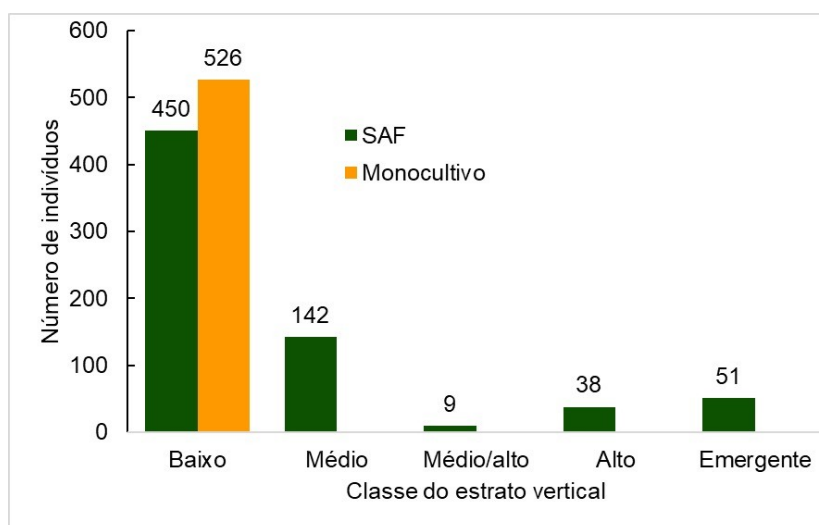


Figura 10. Relação da quantidade de indivíduos perenes em SAF e em Monocultivo e a classificação de suas respectivas espécies no espectro de estratificação da Agricultura Sintrópica

5.2. Manejo agroflorestal baseado em podas sistemáticas

As podas realizadas no SAFS observado atendem a múltiplos propósitos e são determinantes para viabilizar o cultivo densamente consorciado (Tabela 3).

Tipo de Manejo	Objetivo Principal	Frequência e Estratégia
Poda de Estratificação	Manipular a densidade de ocupação das copas em cada estrato, otimizando a entrada de luz e circulação de ar	Duas vezes por ciclo agrícola: 1) Início da estação chuvosa (Out/Nov) para cobertura do solo e ciclagem rápida de C. 2) Final da chuvosa (Mai/Abr). Poda apical e de ramos laterais, seguida de deposição de palhada para proteger o solo contra a seca.
Poda de Sincronização	Sincronizar informação hormonal e ritmo de crescimento para atender demandas associadas às fenofases das culturas	Coincide com a segunda poda de estratificação (Mai/Abr); é usada para estimular a floração de estratos médio/baixo (ex: cafeeiros). Poda apical e/ou drástica para sincronizar crescimento de indivíduos já estabelecidos com novos.
Poda de Formação	Induzir a arquitetura da copa das frutíferas para facilitar tratos culturais e colheitas	Realizada ao fim das safras das espécies (ex: cafeeiros em agosto, abacateiros em abril).
Poda de Limpeza	Eliminar estruturas vegetativas improdutivas, galhos secos e/ou doentes	Ocorre constantemente, sem um período específico e de maneira pontual
Capina Seletiva	Eliminar indivíduos cuja presença em dado momento da sucessão ecológica não seja oportuna para o desenvolvimento do consórcio	Ocorre de maneira dinâmica e constante nos agroecossistemas, específica sobre indivíduos

Tabela 3. Manejo das podas realizadas na área amostrada de SAFS (Sitio Raíz)

A figura 11 demonstra a contribuição de cada espécie perene da comunidade vegetal na dinâmica de deposição de biomassa via podas no SAFS amostrado. Para tanto, a quantidade de indivíduos foi multiplicada pela quantidade de vezes em que a espécie é podada, por ano, no âmbito do manejo orientado para a estratificação e produção de café, abacate e banana, primordialmente. Cabe ressaltar que há um elevado grau de heterogeneidade entre o porte das plantas perenes contabilizadas, porque parte delas foram plantadas em momentos diferentes, e, por isso tem idades diferentes. Por essa razão, o gráfico a seguir (Figura 11) não representa a hierarquia em termos de volume de biomassa que é depositado por espécie. A figura auxilia na percepção da relação existente entre a ocorrência das espécies perenes e a intensidade em que cada uma delas é manejada por meio de podas no agroecossistema.

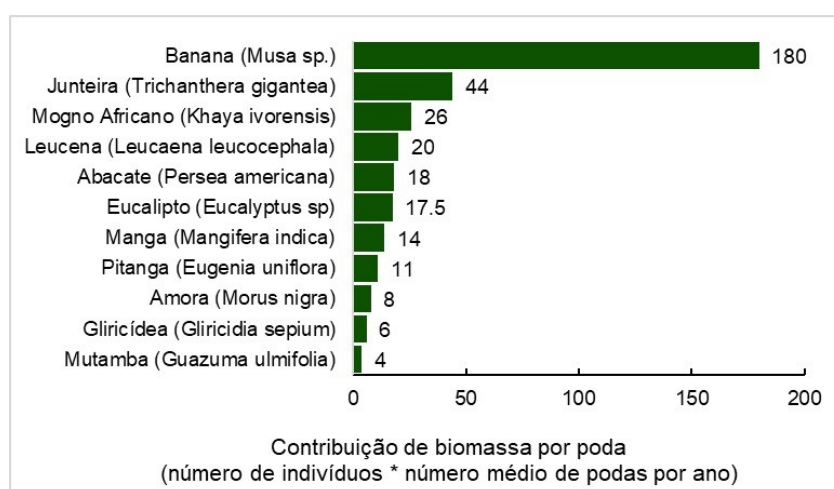


Figura 11. Relação entre a densidade de indivíduos perenes manejados e a frequência anual de podas em cada espécie na área amostrada de SAFS.

5.3. Análise do solo

Foi possível aferir diferenças significativas quanto à média dos teores de COS, P e K disponível (figura 12). A partir da sistematização dos dados, verificou-se: (i) teores de COS na área de SAFS 79.2 % maiores que em Mono; (ii) valores médios de P disponível cerca de 11x maior em Mono (379 mg/dm^3) que em SAFS ($33,5 \text{ mg/dm}^3$) e (iii) teores de K disponível em SAFS ($227,65 \text{ mg/dm}^3$) 2,3x superiores em comparação à Mono (98 mg/dm^3) e 14x superiores em relação ao Pousio ($15,95 \text{ mg/dm}^3$).

O pH do solo apresentou valores brutos mais elevados na área de SAFS, comparada aos demais tratamentos. Porém, do ponto de vista estatístico, não foi possível constatar diferença significativa entre a área de SAFS e a de Monocultivo, mas entre essas e a de Pousio.

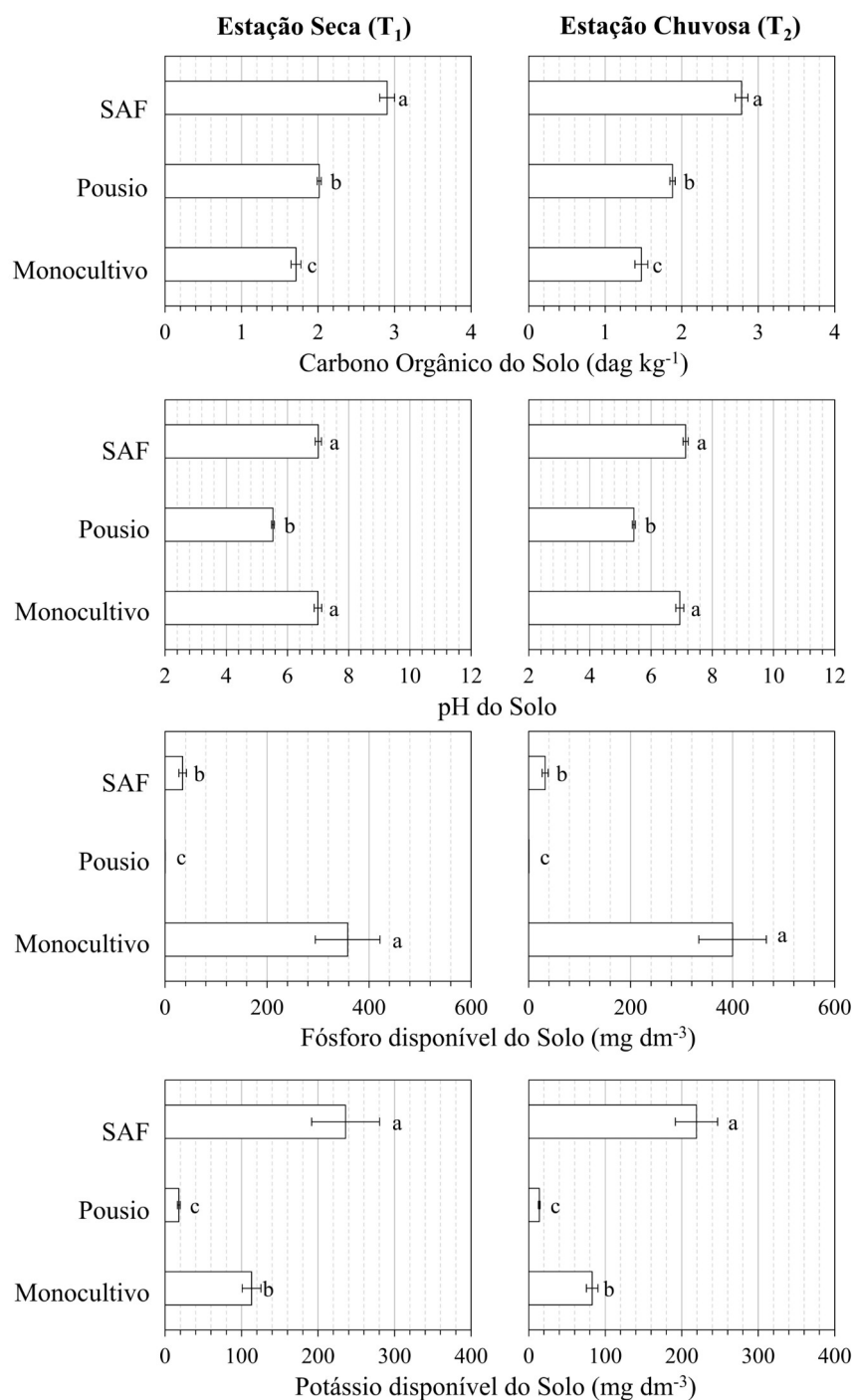


Figura 12. Atributos químicos do solo amostrados na estação seca (T1) e chuvosa (T2) em monocultivo de café, área em pousio e sistema agroflorestral de café (SAF). (A) COS, (B) pH, (C) P disponível, (D) K disponível. Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0.05$)

5.4. Análise de densidade e vigor de vegetação por sensoriamento remoto

Após a sistematização dos dados gerados pela aplicação do Índice de Vegetação OSAVI através de sensoriamento remoto proximal verificou-se valores de OSAVI 285% superiores em SAFS (0.647 ± 0.207) comparado a Mono (0.168 ± 0.253). A hipótese nula ($p < 0.001$) foi rejeitada,

indicando que há uma diferença estatisticamente significativa nos valores médios de OSAVI entre SAFS e Mono, a partir da análise variância (ANOVA), conforme Figura 13.

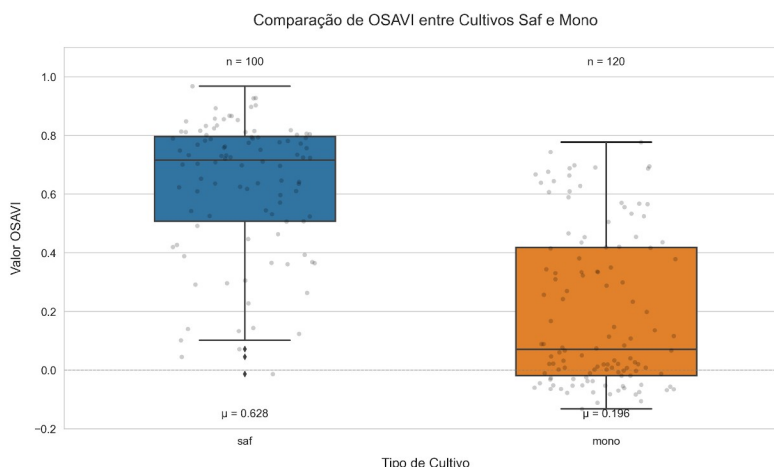


Figura 13. Comparação entre gradientes de valores de Índice de Vegetação OSAVI em SAF e Monocultivo.

6. DISCUSSÃO

A riqueza de espécies vegetais encontrada na área de SAFS (30) favorece a diversidade funcional e gera múltiplos serviços ecossistêmicos. Entre eles, destacam-se o provimento de alimentos e outros produtos (madeireiros e não-madeireiros) e produção de biomassa para cobertura dos solos. Considerando a sensibilidade ambiental da região e a geografia compartilhada com as Unidades de Conservação, agroecossistemas mais biodiversos podem promover pontos de conexão para o fluxo gênico das comunidades e populações locais.

A produção de café associada à produção de outras culturas em escala comercial, como abacate e banana, cará-roxo, inhame e taioba amplia a oferta de itens para o consumo e a venda. Essa diversidade é reportada pelo proprietário do SAFS como estratégica em sua condição de agricultor familiar no Distrito Federal. Sua produção é direcionada principalmente para mercados como feiras livres e compras institucionais, onde a diversidade e oferta constante de produtos são ativos estratégicos para a resiliência econômica do empreendimento familiar.

Quanto à produção de biomassa para incremento de MO no solo, o SAFS observado demonstra a importância atribuída a este serviço ecossistêmico. Assim, 14 entre as 30 espécies do consórcio são árvores que foram introduzidas levando em consideração seu aspecto de caducifolia e 12 entre as 30 espécies são sistematicamente manejadas por meio de podas, contribuindo diretamente para a deposição de biomassa nos solos.

O manejo da palhada de cobertura dos solos dos SAFS fornece alimento e nicho ecológico para que diferentes comunidades de microrganismos coexistam. Desde bactérias que atuam sobre o

material prontamente decomponível até fungos especialistas em digerir lignina. As interações desta comunidade são favorecidas por meio das práticas conservacionistas dos SAFS, que protegem o C nos agregados do solo, elevam os teores de MO no solo (RAKOTOMANGA et al., 2021) e de COS. Deste modo, a biodiversidade planejada no agroecossistema favorece a biodiversidade espontânea no ambiente edáfico, que, por sua vez, influencia em parâmetros adequados de qualidade dos solos (MENDES, 2020).

A baixa riqueza de espécies verificada no Monocultivo reduz o potencial de agregar serviços ecossistêmicos, como a produção de biomassa para cobertura dos solos. A experiência do proprietário do estabelecimento indica que o produtor está buscando incorporar técnicas de manejo para mitigar os efeitos no solo que o declínio de MO acarreta sobre os parâmetros de fertilidade.

Em termos da população de cafeeiros, verificou-se um maior número de plantas de café por área no monocultivo (526) comparado ao SAFS (450). Embora a produtividade não tenha sido avaliada neste trabalho, foi possível inferir, por meio das entrevistas, que o volume de café produzido (por hectare) na Fazenda Novo Horizonte é superior àquela obtida no Sítio Raíz. Evidentemente, a diferença existente entre a escala, os propósitos e as características socioeconômicas de ambos os empreendimentos faz com que o grau de especialização, mecanização e aporte de insumos externos na área de monocultivo favoreçam resultados mais expressivos em termos de produtividade. Somado a essas circunstâncias, o Sítio Raíz é um empreendimento agroflorestal pioneiro no Distrito Federal, de forma que não havia outras referências na região em relação, principalmente, aos melhores consórcios e tratos culturais para um desempenho de excelência em produtividade na cafeicultura orgânica e em policultivo. Assim, o processo de estabelecimento da cafeicultura no Sítio Raíz ocorreu através dos erros e acertos imbuídos na pesquisa-ação da família agricultora.

Deve-se considerar, entretanto, que a agregação de benefícios ecossistêmicos não mensurados economicamente poderá, futuramente, resultar em recebimento de recursos derivados da políticas de Pagamentos por Serviços Ambientais (Lei nº 14.119/2021) e, dessa forma, remunerar os serviços ecossistêmicos prestados para a sociedade além da produção de alimentos. Neste sentido, é valioso considerar que o SAFS garante uma oferta de produtos diversos, com valor econômico e de consumo para a família agricultora e para o abastecimento local que a monocultura não oferece. Adicionalmente, a penosidade do trabalho executado a pleno sol, se comparado à sombra das agroflorestas, tende a se tornar uma variável progressivamente impactante no setor agropecuário em virtude da elevação das temperaturas médias globais.

A despeito dos inúmeros benefícios, há muitos desafios para conciliar a intensidade de trabalho aplicado aos tratos culturais de cada espécie em um policultivo, especialmente associado ao

manejo de podas das árvores. As tecnologias acessíveis aos agricultores familiares são precárias e a sobrecarga é preponderante. Esses fatores influenciam sobremaneira a produtividade das culturas em um sistema mais complexo.

A experiência do agricultor Rômulo Araujo conflui com as evidências de que ao trabalhar com sombreamento para os cafeeiros, é necessário manejar a copa das árvores nos estratos acima para evitar efeitos negativos sobre produtividade, bem como influenciar positivamente a ciclagem de nutrientes e o manejo do microclima das culturas nos estratos baixos (BEER et al, 1998).

A riqueza de espécies (21) na área controle (Pousio) demonstra a biodiversidade espontânea que está associada ao processo de regeneração ambiental do local. Sua análise pode sugerir aspectos relativos à dinâmica ecológica natural em resposta ao histórico de degradação ambiental, fruto de queimadas e desmatamento no passado, sucedido pela implantação de pastos e cultivo de soja (o mesmo histórico da área do Sítio Raíz). Assim, apesar de que, em algum momento, o pasto e a monocultura tenham sido impostos sobre um ecossistema de Cerrado, o fato de que esta área tenha ficado “abandonada” por um período, preservada de intervenções humanas, a dinâmica ecológica do local expressa um processo de regeneração que ocorreu por meio da biodiversidade registrada no levantamento das espécies presentes na área. Entre as quais destacam-se plantas caducifolias (11), que perdem as folhas em determinado período do ano, depositando-as sobre os solos.

A sistematização das podas realizadas nas espécies presentes no SAFS (Tabela 1) demonstra a importância e complexidade desse manejo. É através dessa técnica que consórcios multi-estratificados tornam-se viáveis do ponto de vista da produtividade e da prestação de serviços ecossistêmicos. Esse manejo acelera e favorece a convergência entre pressupostos agrônômicos e ecológicos ao cumprir funções relativas aos tratos culturais (como a capina seletiva, a poda de limpeza e a de formação das copas), bem como as relativas à estratificação e sincronização das espécies.

As podas são realizadas em benefício das relações inter e intra-específicas que se quer privilegiar no contexto biodiverso (PASINI, 2017). No SAF amostrado, a poda de estratificação do consórcio acontece ao mesmo tempo em que a poda de sincronização e é o principal vetor de deposição de biomassa sobre o solo. Segundo o agricultor, essa poda é realizada especialmente sobre os indivíduos dos estratos alto e emergentes e favorece a incidência de luz solar sob os estratos médio e baixo para a otimização deste recurso na fenofase de florescimento de *C. Arabica*. Ademais, essa prática fomenta a circulação de hormônios de rejuvenescimento da comunidade vegetal, favorece maior atividade fotossintética e a produção endógena de biomassa no agroecossistema (PENNEREIRO 1999).

Comparado às demais tecnologias agropecuárias, um dos destaques dos SAF Sucessionais, biodiversos e multiestratificados é a alta densidade de indivíduos perenes que, por meio do manejo das árvores, aportam material lenhoso de seus tecidos vegetais no agroecossistema (JACOBI et al 2025; TERASAKI HART et al 2023). O SAFS avaliado condiz com essa análise. Além de otimizar a ciclagem de celulose, um componente abundante nos resíduos vegetais que é prontamente decomponível pela microbiota do solo, a deposição de madeira agrega lignina aos solos, sendo este um elemento de decomposição lenta, promovida principalmente por fungos e que favorece a formação de MO humificada (AOWN et al, 2022).

A elevada discrepância entre os parâmetros de COS, no qual o teor verificado em SAF é 79,2% superior ao verificado em Mono, está, provavelmente, associada à maior deposição de MO que ocorre sob o manejo agroflorestal, já que a poda sistemática de árvores contribui para a maior diversidade e complexidade de compostos orgânicos depositados nos solos (ASARE et al, 2014). Paralelamente, a alta densidade de espécies vegetais contribui com a deposição de C no solo por meio dos exsudatos de carboidratos na rizo sfera. Mendes (2020) verificou uma tendência de aumento nos teores de COS à medida que aumenta o tempo sob manejo agroflorestal.

As taxas de COS inferiores no monocultivo podem estar relacionadas à limitada diversidade funcional de espécies. Em razão do manejo orientado para a monocultura, a deposição de MO vegetal no solo ocorre apenas por meio da roçagem de *B. decumbens* e do aporte de cascas dos cafés. Em paralelo, a aplicação de insumos altamente solúveis, associados à intensiva mecanização, pode estar atrelado ao aumento da oxidação da MO, afetando a capacidade de estabilização de COS (PRIMAVESI, 2022).

Utilizando como base os indicadores da iniciativa *4 por 1000 – Solos para Segurança Alimentar e Clima*⁴, que incentiva a promoção de técnicas regenerativas no setor dos usos da terra, o incremento de apenas 0,4% de C nos primeiros 30-40 cm de solo (em média, 0,6 Mg/ha) anualmente pode reduzir as emissões anuais de CO₂ atmosférico de maneira significativa e conter a progressão atual do aumento das temperaturas médias globais.

Considerando que a média dos teores de COS verificado em SAFS é 1,25 dag/kg maior que a média no monocultivo e 0,89 dag/kg maior que na área em pousio, o potencial do SAFS de incrementar COS supera a meta da referida iniciativa internacional em 3,1x, quando comparado ao monocultivo e em 2,2x quando comparado à área em pousio (controle).

⁴ “4 per 1000” é uma Iniciativa Internacional organizada pela *Alliance Bioversity International (CIAT)*, uma organização sediada em Montpellier (França)

Comparando os dois agroecossistemas, a diferença de 1,25dag/kg de COS a mais reportado na área de SAF representa um potencial de aumento de estoque de COS em 37,5 t/ha⁻¹. Considerando a meta do PLANO ABC+ em ampliar as áreas de Sistemas Agroflorestais em 0,1 milhões de hectares, utilizando como referência os valores encontrados na presente pesquisa, a conversão de monocultivos em SAFS poderia representar um estoque anual de 3.750.000 toneladas de C.

No que se refere aos valores obtidos para o pH dos solos, deve-se considerar que solos mais ácidos são típicos no bioma Cerrado. Conforme relato do proprietário da área de SAFS, em 2013, o pH registrado foi de 4,6, antes da implantação dos agroecossistemas, o que representa um valor ainda mais ácido do que o registrado nesta pesquisa na área em Pousio, sem manejo (T1 5,53 e T2 5,54). Com a evolução dos anos sob manejo agroflorestal, o valor atual de 7,1 na estação seca (T1) e 7,13 na estação chuvosa (T2) demonstra que esse parâmetro foi fortemente alterado, tornando-se mais alcalino.

A ausência de diferença estatística entre os teores de pH em SAFS e Monocultivo é especialmente relevante, porque em Monocultivo, o protocolo de correção de solos por meio de calagem ocorre de maneira cíclica (em média, anual ou bianualmente) ao passo que a última aplicação deste protocolo no SAFS ocorreu em 2017, há oito anos.

Assim, a elevação do pH no SAF indica, possivelmente, a correlação entre o incremento de MO, o efeito residual da aplicação de remineralizadores (THEODORO *et al.*, 2022) e a maior eficiência da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) nos solos, favorecendo a desacidificação, como evidenciado no trabalho de Matos et al (2025).

Albercht e Kandji (2003) argumentam que, ao passo que os SAFS representam significativas contribuições em consideração às emergências climáticas, um dos desafios para sua viabilidade em certas regiões está relacionada ao baixo potencial de solos ácidos em favorecer o crescimento de espécies arbóreas, sendo este um fator fundamental do seu desenvolvimento. Todavia, os resultados encontrados no presente trabalho indicam forte evidência de que o manejo agroflorestal empregado na área pesquisada, em solos tipicamente ácidos, não apenas demonstrou a viabilidade deste uso da terra em termos da produção agrícola associada a alta biodiversidade arbórea, como também indicou melhoria em parâmetros de qualidade dos solos e, ainda, contribuiu para a alcalinização dos solos ao longo do tempo.

As disponibilidades de P e K no solo apresentaram resultados opostos nos dois agroecossistemas. O P disponível em Mono foi muito superior ao SAF. A discrepância possivelmente retrata a adubação anual com fontes solúveis deste nutriente na área de monocultivo. No entanto, cabe

ressaltar que o P orgânico no solo, possivelmente maior no SAF, não é extraído pelo extrator Mehlich-1.

A área de SAFS apresentou teores de K 2,3x maiores que em Mono e 14x maiores que em Pousio. Este resultado sugere uma contraposição à análise feita por Dias et al. (2025), na qual os autores afirmam que somente fontes de K solúvel, como o cloreto de potássio e sulfato de potássio, podem atender às demandas de K das culturas. Diante do fato de que a correção de solos com uso de remineralizadores de baixa solubilidade ocorreu na área de SAFS oito anos atrás, os valores presentes de K indicam, possivelmente, que a ciclagem de nutrientes através da constante deposição de biomassa e o incremento da decomposição de MO têm resultado em maior eficiência de retenção de K neste agroecossistema. Dessa forma, a melhoria dos atributos químicos de fertilidade do solo na área observada de SAFS está associada às práticas conservacionistas e ao manejo que favorecem um ambiente de constante ciclagem de compostos orgânicos diversificados que, por sua vez, resultam em menor dependência de insumos externos, cujas cadeias de produção são vetores de emissões.

Conforme verificado na área amostrada, os parâmetros de fertilidade do solo resultam, em parte, da influência da biodiversidade planejada que otimiza o aproveitamento de recursos. Assim, amplia-se a atividade fotossintética e a produção de biomassa concomitante à produção agrícola. Por essas razões, esse agroecossistema promove maior eficiência na metabolização e conversão da energia primária em formas cada vez mais complexas de vida.

A imagem captada, por meio de sobrevôo de VANT, demonstrou superioridade expressiva quanto ao Índice de Vegetação OSAVI no SAF (0.647 ± 0.207) comparado a Mono (0.168 ± 0.253). Ao mensurar a reflectância dos agroecossistemas, os valores encontrados nessa pesquisa comparativa são indicativos de saúde e densidade foliar. Estão associados à absorção de luz vermelha por meio da fotossíntese e à emissão de luz do infravermelho próximo (NIR).

A média dos valores de SAFS é cerca de 4x maior que a média em Mono. De um lado, esse dado é ilustrativo da elevada densidade populacional verificada em SAF no levantamento florístico. De outro, considerando que o processamento da imagem captada da cobertura vegetal é bidimensional, a área foliar de plantas que porventura estivesse subposta ao dossel de outras no momento do sobrevôo possivelmente não foi mensurada. Com um processamento tridimensional, a média dos valores deste Índice, provavelmente, seriam ainda maiores em SAFS, considerando sua característica de vegetação multiestratificada.

Os valores encontrados em SAF são sugestivos de que um importante benefício da biodiversidade funcional e sucessional constatada, organizada por meio da estratificação das espécies

e manejada por meio das podas, é a otimização da atividade fotossintética no agroecossistema. Mesmo em momentos críticos para os cultivos, como no estágio avançado da seca. Nesse aspecto é importante considerar que a imagem foi gerada no período avançado da estação seca na região, especialmente crítico para os cafeeiros devido às temperaturas mais elevadas. Em razão deste fato, é provável que o Índice de Vegetação OSAVI aferido seja ilustrativo da performance mais debilitada em termos de vigor e densidade foliar dos agroecossistemas.

Albercht e Kandji (2003) discorrem sobre como as condições edáficas podem prejudicar o ritmo de crescimento das espécies arbóreas e, por consequência, a ciclagem de MO nos agroecossistemas. No caso das áreas pesquisadas, a justaposição de fatores edáficos adversos (como solos com teores de pH originalmente ácidos) à característica regional de clima estacionário impõe condições inferiores para o crescimento vegetativo se comparado, por exemplo, às florestas tropicais úmidas (LYOD, 2013). Entretanto, do ponto de vista dos Sistemas Agroflorestais Sucessionais, circunstâncias edafo-climáticas adversas não tornam uma região imprópria para o estabelecimento desse uso da terra e, sim, demandam conhecimento específico sobre o funcionamento do ecossistema nativo para orientar o planejamento do SAF a ser implementado (JACOBI et al, 2025).

Por essa razão, entre muitas outras vantagens, os SAF Sucessionais representam sistemas especialmente estratégicos para conciliar a recuperação de áreas degradadas com benefícios à sociedade e à estabilidade do clima (JACOBI et al., 2025; REBELLO, SAKAMOTO, 2022; PENEREIRO, 1999; KOUTIKA, 2023; PASINI, 2017). Os resultados do presente trabalho reforçam indicadores deste uso da terra como estratégico para a mitigação das emissões geradas pelos agroecossistemas, sendo ferramenta essencial para a redução dos GEE por meio da agricultura. Incorporar e manejar árvores nos agroecossistemas promove a otimização da atividade fotossintética, intensifica a ciclagem de material orgânico derivado das podas, especialmente de tecidos lenhosos, favorecendo a captura do CO₂ atmosférico e deposição de CO no solo.

7. CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa demonstraram valores médios do Índice de Vegetação OSAVI 285% superiores no Sistema Agroflorestal Sucessional (SAFS) avaliado, comparado ao monocultivo. Este fator indica expressiva maior capacidade de promoção da atividade fotossintética no agroecossistema. Os teores de Carbono orgânico do solo (COS) demonstraram uma média 78% maior na área de SAFS comparada ao monocultivo, o que representa um incremento anual de 37,5 ton/ha⁻¹. Ao utilizar os parâmetros da campanha internacional “4 por 1000” como referência e as metas do Plano ABC+ de

ampliação dos Sistemas Agroflorestais no Brasil, verifica-se que há um elevado potencial do SAFS analisado como mecanismo de mitigação das mudanças climáticas. A maior densidade, riqueza e complexidade de espécies vegetais constatadas, organizadas de forma estratificada e manejadas em favor da sucessão ecológica, incrementam a diversidade funcional e ampliam a prestação de serviços ecossistêmicos. Todavia, apesar dos resultados promissores, os policultivos de maior complexidade apresentam desafios inerentes à conciliação de múltiplas operações, o que resulta em uma demanda intensiva de mão de obra e conhecimento especializado. Para tanto, o desenvolvimento e a acessibilidade de tecnologias que facilitem a mecanização do trabalho, bem como instrumentos de remuneração das/os agricultoras/es pelos serviços ecossistêmicos prestados é parte fundamental do paradigma da transição para sistemas agrícolas compatíveis com a agenda de mitigação das mudanças do clima.

8. REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. (2003). Carbon Sequestration in Tropical Agroforestry Systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 99, p. 15-27, 2003.
- AMARAL, T R (2021). Brasília e Cerrado: leituras do território por meio da paisagem. 278 f, il. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de Brasília, Brasília
- ANDRADE, D. (2019). Agricultura, meio ambiente e sociedade. Um estudo sobre a adotabilidade da Agricultura Sintrópica. Tese de Doutorado apresentada no PPGCEAC/UFRJ.
- ANIS, C C, CARLA, RUVIARO, C. (2022). Mercado de carbono agrícola: realidade ou desafio? *Multitemas*. 27(65) 163-188. <https://doi.org/10.20435/multi.v27i65.3396>
<https://doi.org/10.20435/multi.v27i65.3396https://doi.org/10.20435/multi.v27i65.3396>
- ASARE R, AFARI-SEFA V, OSEI-OWUSU Y, PABI O. (2014) Cocoa agroforestry for increasing forest connectivity in a fragmented landscape in Ghana. *Agroforest Systems*, 88:1143–1156. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9688-3>
- BARBOSA, H. (2014) Vapor de água na atmosfera: do efeito estufa às mudanças climáticas. SP. São Paulo n. 103 p. . 67-80
- BARNOSKY, A. D. et al (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived/*Nature*, 2011.
- BEER J, MUSCUSCHLER R, KASS D, SOMARRIBA E (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agrofor. Syst.* 38, 139–16
- BINI, D.; FIGUEIREDO, A. F., DA SILVA, M. C. P., DE FIGUEIREDO VASCONCELLOS, R. L.; CARDOSO, E. J. B. N. Microbial biomass and activity in litter during the initial development of pure and mixed plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 76–85, 2012
- CANNON, A.J. (2025) Twelve months at 1.5 °C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold. *Nature Climate Change*,. v. 15, p. 266–269,.
- CARDINAEL, R., CADISCH, G., GOSME, M., OELBERMANN, M., VAN NOORDWIJK, M. (2021). Climate change mitigation and adaptation in agriculture: Why agroforestry should be part of the solution. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 319, Article 107555. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107555>

- CARDINAEL, R., UMULISA, V., TOUDERT, A., OLIVIER, A., BOCKEL, L. E BERNOUX, M (2018). Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems, *Environ. Res. Lett.* 13(12), 124020. DOI: 10.1088/1748-9326/aaeb5f.
- CARDINAEL, R.; CADISCH, G.; GOSME, M.; OELBERMANN, M.; van NOORDWIJK, M. Climate change mitigation and adaptation in agriculture: Why agroforestry should be part of the solution. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 319, Article 107555, 2021.
- CARVALHO A M X, MENDES F Q, MENDES F Q, TAVARES L F, 2020. SPEED Stat: a free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 20 (3) <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3s46>
- CHURCHMAN J, SINGH M, SCHAPPEL A, SARKAR B, BOLAN, N (2020). Clay Minerals as the Key to the Sequestration of Carbon in Soils. *Clays and Clay Minerals*. 68. 10.1007/s42860-020-00071-z
- CRIPPA, M., GUIZZARDI, D., PAGANI, F., BANJA, M., MUNTEAN, M. et al., GHG emissions of all world countries - 2025 Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, doi:10.2760/9816914, JRC143227.
- DAMATTA, F. M. (2004). Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research* 86, 99–114.
- DELGADO G C (2001) Expansão e modernização do setor agropecuário no pós-guerra: um estudo da reflexão agrária *Estudos Avançados* 15 (43)
- DIAS, RC, ZONTA, E, TEIXEIRA, PC et al (2025) Agrominerais silicáticos são fontes eficientes de potássio para plantas cultivadas? Uma meta-análise. *Tópicos em Ciência do Solo (SBSC)*.
- DYNARSKI K. A., BOSSIO D. A. and SCOW K. M. (2020) Dynamic Stability of Soil Carbon: Reassessing the “Permanence” of Soil Carbon Sequestration. *Front. Environ. Sci.* 8: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.514701>
- FAO, FIDA e PMA. O Estado da Insegurança Alimentar no Mundo, 2014. Fortalecimento de um ambiente favorável para a segurança alimentar e nutrição. Relatório. Roma, 2014.
- FAO. 2023. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023.
- FUJISAKI K, CHEVALLIER T, CHAPUIS-LARDY L, ALBRECHT A, RAZAFIMBELO T, MASSE D, NDOUR Y B, CHOTTE J-L (2018) Soil carbon stock changes in tropical croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 259 <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.008>.
- GLIESSMAN S R (2001) Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 653 p.
- GANZENMÜLLER R, OBERMEIER W A, BULTAN S, SPAWN-LEE S A, ZABEL F, PONGRATZ P (2025) Humans have depleted global terrestrial carbon stocks by a quarter, *One Earth*, Volume 8, Issue 8 <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101392>.
- GÖTSCH E O (1995) Renascer da Agricultura. Centro Sabiá, Recife.
- GOMES L.C., BIANCHI F.J.J.A., CARDOSO I.M., FERNANDES R.B.A., FERNANDES FILHO E.I., SCHULTE R.P.O. (2020) Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, (294) <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>.

GREENTEC (2010) Disponível:

<https://agenciabrasilia.df.gov.br/documents/26676051/26707107/3-EIA.pdf>

GRISCOM, B. W. et al. Natural climate solutions. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 114, 11645–11650 (2017).

GRONINGEN, J. W., van KESSEL, C., HUNGATE, B. A., OENEMA, O., POWLSON, D. S., van GROENIGEN, K. J. (2017). Sequestering soil organic carbon: a nitrogen Dilemma, *Environ. Sci. Technol.* 51(9), 4738–4739. DOI: 10.1021.

HUNTINGTON H P (2000), using traditional ecological knowledge in science: methods and applications. *Ecological Applications*, 10: 1270-1274. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)10\[1270:UTEKIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)10[1270:UTEKIS]2.0.CO;2)

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.

<https://www.ibram.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/11/1-RIMA.pdf>

KLINK, C. A, MACHADO, R. B. (2005). A conservação do Cerrado brasileiro. *Megadiversidade*, v. 1, n. 1, p. 147–155

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponível: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> Acesso: outubro 2025

IPCC (2019). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCLChapter_5.pdf.

JACOBI J.; ANDRES C.; ASSAAD F. F.; BELLON S.; COQUIL X.; DOETTERL S.; DIERKS J. (2025). Syntropic farming systems for reconciling productivity, ecosystem functions, and restoration. *The Lancet Planetary Health*, 9(4), e314-e325.

KRENAK, A. *Ideias para adiar o fim do mundo*. São Paulo: Editora: Companhia das Letras, 2019.

KOUTIKA, L-S, NICOLAS M, RÉMI C (2023). The contribution of agroforestry systems to improving soil carbon sequestration. 10.19103/AS.2022.0106.19.

LEMAIRE, G., GASTAL, F., FRANZLUEBBERS, A. et al. (2015) Grassland–Cropping Rotations: An Avenue for Agricultural Diversification to Reconcile High Production with Environmental Quality. *Environmental Management* 56, 1065–1077 <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0561-6>

LENTON T. M., ROCKSTRÖM J., GAFFNEY O., RAHMSTORF S., RICHARDSON K., STEFFEN W., SCHELLNHUBER H. J. (2019). Climate tipping points - too risky to bet against. *Nature* 575, 592–595

LINI, P (2024) Monocultura de paisagens e mentes: a noção de plantation como construto mental no neocolonialismo brasileiro. *OPIS*, Goiânia, 21(1) DOI: 10.61470/o.v21i1.74526. Disponível: <https://periodicos.ufcat.edu.br/index.php/Opsis/article/view/74526>. Acesso: 24 out. 2025.

LORENZ, K.; LAL, R. (2005). The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons, *Adv. Agron.* 88, 35–66

Ma Z. L.; CHEN, H. Y. H.; BORK, E. W.; CARLYLE, C. N; CHANG, S. X. (2020). Carbon accumulation in agroforestry systems is affected by tree species diversity, age and regional climate: a global meta-analysis, *Glob. Ecol. Biogeogr.* 29(10), 1817–1828. DOI: 10.1111/geb.13145.

- MATOS, P. F.; PESSOA, V. L. S. (2011) A modernização da agricultura no Brasil e os novos usos do território. *Geo Uerj*, 2(22) p. 290-322.
- MATOS O S, OLIVEIRA J M, CARVALHO M T M, MADARI B E, SILVEIRA A R L, DAMIAN J M, MORAES P A O, ARAUJO W A, SIQUEIRA M M B, SILVA R R, FERRARESI T M, STONE L F, SILVA M A S, FREITAS F M C, PACHECO A R, YELUPIRATI J, ALMEIDA P L O (2025) Impact of land use intensification on key drivers of soil organic carbon pools in Brazil's Central-West. *Catena*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108636>
- MEDEIROS F P, CARVALHO A M X, RAMOS CG, DOTTO G L, CARDOSO IM, THEODORO SH (2024) Rock Powder Enhances Soil Nutrition and Coffee Quality in Agroforestry Systems. *Sustainability*. 16, 354. <https://doi.org/10.3390/su16010354>
- MENDES, S. P. (2020) Características químicas, físicas e microbiológicas de solos em sistemas agroflorestais em diferentes estágios sucessionais. 2020. 53 f., il. Dissertação de Mestrado PPGMADER/UnB Disponível: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/39484>
- MICCOLIS A, PENEIREIRO F M, MARQUES H R, VIEIRA D L.M, ARCO-VERDE M F, HOFFMANN M R, REHDER T, PEREIRA A V B (2016) Restauração Ecológica com Sistemas Agroflorestais: como conciliar conservação com produção. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza - ISPN/Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal - ICRAF
- NAIR, P. K. R., NAIR, V. D., MOHAN KUMAR, B. and SHOWALTER, J. M. (2010). Carbon sequestration in agroforestry systems, *Adv. Agron.* 108, 237–307. DOI: 10.1016/ S0065-2113(10)08005-3.
- NEUMAN W L (2006). *Social research methods: qualitative and quantitative approaches* (6th ed). Pearson Education, Inc. Boston.
- NOAA National Centers for Environmental Information. Monthly Global Climate Report for January 2025. Online. Fevereiro, 2025, recuperado em 28 out., 2025. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202501>. Acesso: 10 out. 2025.
- NYGREN, P., FERNANDEZ, M. P., HARMAND, J. M. AND LEBLANC, H. A. (2012). Symbiotic dinitrogen fixation by trees: an underestimated resource in agroforestry systems?, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 94(2–3), 123–160. DOI: 10.1007/s10705-012-9542-9.
- OBSERVATÓRIO DO CLIMA (2023) Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2023. Disponível: <https://energiaeambiente.org.br/produto/emissoesdegasesdeefeitoestufaem2023>. Acesso: 27 out. 2025
- OLIVEIRA, A. S. (2023). O Plano ABC como Política Pública de Mitigação de Gases de efeito estufa no bioma Cerrado Dissertação Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural. Brasília, DF, Brasil: Universidade de Brasília. Disponível: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/49583>
- PASINI, F. S. (2017) A Agricultura Sintrópica de Ernst Götsch: história, fundamentos e seu nicho no universo da Agricultura Sustentável. Dissertação apresentada no Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PAVINATO, P.S., CHERUBIN, M.R., SOLTANGHEISI, A. et al. (2020). Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. *Sci Rep* 10, 15615. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>
- PENEIREIRO, F. M. (1999) Sistemas Agroflorestais Dirigidos Pela Sucessão Natural: Um Estudo De Caso. Disponível: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11142/tde-20220207-205206/publico/PeneireiroFabianaMongeli.pdf>

- PORTO, M. F.; SOARES, L. W. (2012) Modelo de desenvolvimento, agrotóxicos e saúde: um panorama da realidade agrícola brasileira e propostas para uma agenda de pesquisa inovadora. *Revista brasileira de Saúde ocupacional* 37 17-31.
- PEREIRA, A. P. A., DE ANDRADE, P. A. M., BINI, D., DURRER, A., ROBIN, A., BOUILLET, J. P., ANDREOTE, F. D. AND CARDOSO, E. J. B. N. (2017). Shifts in the bacterial community composition along deep soil profiles in monospecific and mixed stands of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*, *PLoS ONE* 12(7), e0180371.
- PRIMAVESI, A. Manejo ecológico do solo: A agricultura em regiões tropicais. São Paulo: Nobel, 2002.
- RAKOTOMANGA D, LACOMA M, DOREL M. et al. (2021) Cover crops combined with soil tillage impact the spontaneous species density, richness and diversity in banana cover cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 37. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00692-1>
- REBELLO, J. F. S.; SAKAMOTO, D. G. (2022) *Agricultura Sintrópica segundo Ernst Götsch / José Fernando dos Santos Rebello, Daniela Ghiringhello Sakamoto; 2ª edição. Alto Paraíso de Goiás, GO: Edições Aguará.*
- ROE, S. et al. (2021) Land-based measures to mitigate climate change: potential and feasibility by country. *Glob. Change Biol.* 27, 6025–6058
- ROCHA L. F. (2024) Estudo da legislação brasileira acerca do mercado de carbono : agricultura familiar e remineralizadores de solo. Dissertação Mestrado apresentada no PPGMADER/UnB. Disponível: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/50698>
- ROMEIRO, A.R. “Meio Ambiente e Dinâmica de Inovações na Agricultura”. FAPESP, Annablume: São Paulo, 1998.
- SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima (2024) Relatório Estimativa de emissões de Gases de Efeito Estufa nos sistemas alimentares no Brasil, Acesso: 26/04/2025 – www.seeg.eco.br
- SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (2020). 9º Relatório do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Análise das Emissões Brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas complicações para as metas do Brasil 1970-2020. SEEG. Observatório do Clima. Disponível em: [OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf](#)
- SCHEMBERGUE A, CUNHA D A, CARLOS S M, PIRES M V, FARIA R M (2017) *Rev. Econ. Sociol. Rural* 55 (1) <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550101>
- SCOTT, C.E., MONKS, S.A., SPRACKLEN, D.V. et al. (2018). Impact on short-lived climate forcers increases projected warming due to deforestation. *Nat Commun* 9, 157 <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02412-4>
- SOARES GJ, THEODORO SH, CARVALHO AXM, BURBANO DFM, RAMOS CG. (2022) Remineralizadores de suelos y sistemas agroforestales: una opción para la captura de CO₂ *Revista Agroecología* 15(1). <https://doi.org/10.59187/revistaagroecologia.v15i1>
- SOARES GJ. (2018). Influência da roçagem no desenvolvimento de sistemas agroflorestais e na captura de dióxido de carbono atmosférico. Dissertação de Mestrado no Programa Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural. Brasília: Universidade de Brasília - UNB/Faculdade de Planaltina. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/33088?locale=en>. Acesso: fev 2025
- SOUZA, H. N, GOEDE, R. G. M, BRUSSAARD, L, CARDOSO, I. M, DUARTE, E. M. G, FERNANDES, R. B. A, GOMES, L. C, PULLEMAN, M. M. (2012). Protective shade, tree

diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 146(1), 179-196.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.007>

SUAREZ, A; GWOZDZ, W. (2023) On the relation between monocultures and ecosystem services in the Global South: A review. *Biological Conservation*, Volume 278, 109870.

STEENBOCK, W.; VEZZANI, F.M.; COELHO, B.H.S.; SILVA, R.O. (2021) Agrofloresta agroecológica: por uma (re) conexão metabólica do humano com a natureza. *Guaju*, 6(2), p. 47-70,.

TERASAKI HART, D. E, YEO, S, ALMARAZ, M, BEILLOUIN, D, CARDINAEL, R, GARCIA, E, ... & COOK-PATTON, S. C. (2023). Priority science can accelerate agroforestry as a natural climate solution. *Nature Climate Change*, 13(11), 1179-1190.

THEODORO S. H., MANNING, D. A. C., CARVALHO, A. X. M., FERRÃO, F. R., ALMEIDA, G. R. (2022) Soil remineralizer: a new rote to sustentability for Brazil, a giant exporting agro-mineral commodities. In: Yakovleva, N. Nickless, E. (eds) *Routledge Handbook of the Extractive*. 1stEd. 261-281 <https://doi.org/10.4324/9781003001317>

THEODORO SH, BARROS JC (2011). Política Nacional de meio Ambiente: conquistas e perspectivas. In: Theodoro SH (Org). *Os 30 anos da Política Nacional de Meio Ambiente*, 17-48. ISBN: 978-8576172444

TORQUEBIAU, E. F. (2000). A renewed perspective on agroforestry concepts and classification C. *R. Acad. Sci. III*3231009–17

TORRES, C M M E, JACOVINE L A G, OLIVEIRA NETO S N, BRIANEZI D, ALVES E B B M (2014) Sistemas Agroflorestais no Brasil: Uma Abordagem Sobre a Estocagem De Carbono. *Pesquisa Florestal Brasileira* 34.79 (2014): *Pesquisa Florestal Brasileira*, Vol.34 (79).

VASCONCELLOS RC, BELTRÃO NES (2018) Avaliação de prestação de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais através de indicadores ambientais. *Interações*, Campo Grande, 19(1), p. 209–220, 2018. Disponível: <https://interacoesucdb.emnuvens.com.br/interacoes/article/view/1494> . Acesso: 21 out. 2025.

VAZ, S. P. P. Sistemas agroflorestais para recuperação de matas ciliares em Piracicaba, SP. p. 98, 2002.

WEZEL A, BELLON S, DORÉ T, FRANCIS C, VALLOD D, DAVID C (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 29(4): 2-15. <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>

WMO - World Meteorological Organization (2025). *State of the Global Climate 2024*. No. 1368. Geneva: Wo

rld Meteorological Organization.

YEOMANS JC, BREMMER JM (1988) Carbon and nitrogen analysis of soils by automated combustion techniques. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22:843-850,