



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
DOUTORADO EM AGRONOMIA

MILA FAÇANHA GOMES

**SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PALMA DE ÓLEO NA
AMAZÔNIA ORIENTAL**

BELÉM/PARÁ

2024

MILA FAÇANHA GOMES

**SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PALMA DE ÓLEO NA
AMAZÔNIA ORIENTAL**

Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doutor em Agronomia

Orientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos

BELÉM/PARÁ

2024

DEDICO,

AO MEU PAI, OMAR DA MATA GOMES (*in memorian*)

A MINHA TIA, PATRICIA GONÇALVES FAÇANHA (*in memorian*)

A MINHA MÃE, SIMONE GONÇAVES FAÇANHA

A MINHA IRMÃ, MIRNA FAÇANHA GOMES

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

À Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela oportunidade concedida para realização da graduação, mestrado e doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

Ao meu orientador Dr. Steel Vasconcelos (EMBRAPA), pela paciência, serenidade, apoio, por tornar a jornada acadêmica leve e factível e pela confiança em mim depositada.

Aos parceiros do projeto SAF-Dendê: Natura Inovação e Tecnologia e Produtos LTDA, Centro Agroflorestal Mundial (ICRAF), Cooperativa Mista de Tomé-Açu (CAMTA), Embrapa Amazônia Oriental e Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional. (USAID).

Ao corpo técnico do Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis (LASS), em especial a Neusa Ferreira, Ivanildo Trindade e Everson Lima, pelo apoio, paciência e profissionalismo.

A minha mãe Simone Façanha, que é meu espelho como mulher, pessoa e profissional. A minha irmã Mirna Façanha Gomes, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu esposo Rodrigo Alfaia, pela compreensão, amor, cuidado e incentivo.

Aos meus familiares, primos, tios, em especial as minhas avós Raimunda Conceição Gomes e Maria da Conceição Gonçalves, as minhas tias Cláudia e Denise Gomes, que me acompanham desde o início da vida e jornada acadêmica.

Aos amigos e companheiros de vida Luiz Fernando Morais, Ana Renata Abreu, Maynara Gomes, Larissa Miranda, Diego Barreiros, Manuella Raiol, Kleve Canteral, Alessa Mendanha e Priscila Barros, pela amizade, parceria, apoio em todos os momentos da minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO.....	16
ABSTRACT	18
1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	20
REFERÊNCIAS	24
2 INDICADORES DE SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL.....	28
RESUMO.....	28
2.1 Introdução	29
2.2 Material e Métodos.....	31
2.2.1 Área de estudo	31
2.2.2 Implantação e manejo dos sistemas agroflorestais	32
2.2.3 Desenho amostral	34
2.2.4 Análises de solo	35
2.2.4.1 Indicadores da saúde química do solo	35
2.2.4.2 Indicadores da saúde biológica do solo	36
2.2.4.3 Indicadores da saúde física do solo	36
2.2.4.4 Estoque de carbono orgânico do solo	37
2.2.5 Análise estatística	38
2.3 Resultados	38
2.3.1 Indicadores da saúde química e biológica do solo	38
2.3.2 Indicadores da Saúde Física	40
2.3.3 Correlações entre os indicadores de saúde do solo.....	40
2.3.4 Análise de componentes principais	42
2.4 Discussão	43
2.4.1 Saúde química e biológica do solo	43

2.4.2	Saúde física do solo	47
2.4.3	Relações entre os indicadores de saúde do solo	49
2.4.4	SAFs com palma de óleo para construção da saúde do solo	49
2.4.5	Perspectivas para sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia	50
2.5	Conclusões	51
REFERÊNCIAS		52
3	ENZIMAS E CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	60
RESUMO.....		60
3.1	Introdução	60
3.2	Material e métodos	63
3.2.1	Área de estudo	63
3.2.2	Desenho Experimental.....	68
3.2.3	Preparo e análises de solo	70
3.2.4	Análise estatística	71
3.3	Resultados	72
3.3.1	Efeitos dos tipos de cobertura do solo nos indicadores de saúde do solo	72
3.3.2	Efeitos dos tipos de sistemas de produção de palma de óleo nas zonas de manejo .	73
3.3.3	Variação relativa dos indicadores de saúde do solo entre sistemas de cobertura do solo e entre zonas manejo	76
3.3.4	Correlação.....	77
3.4	Discussão	78
3.4.1	Atividade enzimática varia entre os sistemas de cobertura do solo	78
3.4.2	Mudanças em COT e CPOX entre os sistemas de cobertura do solo.....	79
3.4.3	Distribuição espacial dos indicadores de saúde do solo em sistemas de cultivo de palma de óleo.....	80
3.4.4	Correlação entre os indicadores de saúde do solo	81

3.5	Conclusão	82
	REFERÊNCIAS	82
4	SENSIBILIDADE DO CARBONO OXIDÁVEL POR PERMANGANATO PARA DETECTAR MUDANÇAS DE CURTO PRAZO NA SAÚDE DO SOLO EM SISTEMA AGROFLORESTAL E MONOCULTIVO DE PALMA DE ÓLEO	95
	RESUMO.....	95
4.1	Introdução	96
4.2	Material e métodos	98
4.2.1	Área de estudo	98
4.2.2	Desenho Experimental.....	105
4.2.3	Análises de solo	105
4.2.4	Análise estatística	106
4.3	Resultados	106
4.3.1	Evolução de CPOX e COS nos sistemas de cobertura do solo	106
4.3.2	Evolução de CPOX e COS nas zonas de manejo dos sistemas de cultivo de palma de óleo	108
4.3.3	Correlação.....	111
4.4	Discussão	111
4.4.1	Cobertura do solo	111
4.4.2	Zonas de manejo.....	113
4.4.3	O CPOX captura mudanças de curto prazo na saúde do solo como o COS?	115
4.5	Conclusão	115
	REFERÊNCIAS	116
	APÊNDICE A – Aplicação da BioAnálise em sistemas agroflorestais e monocultivo de palma de óleo na Amazônia Oriental	122
	APÊNDICE B – Sistema agroflorestal mais diversificado da fazenda 2 (linha dupla de palma de óleo e caminho da colheita)	127

APÊNDICE C – Faixa diversificada do sistema agroflorestal mais diversificado da fazenda 2	128
APÊNDICE D – Sistema agroflorestal menos diversificado da fazenda 2 (linha de palma de óleo, empilhamento de folhas podadas de palma de óleo e faixa diversificada).....	129
APÊNDICE E – Faixa diversificada do sistema agroflorestal mais diversificado da fazenda 2	130
APÊNDICE F: Vista frontal do sistema agroflorestal mais diversificado da fazenda 3 (faixa diversificada, empilhamento de folhas podadas de palma de óleo, linha de palma de óleo e caminho da colheita).....	131
APÊNDICE G: Sistema agroflorestal menos diversificado da fazenda 3 (caminho da colheita, linha de palma de óleo, empilhamento de folhas podadas de palma de óleo e faixa diversificada)	132
APÊNDICE H – Deposição de resíduos orgânicos de origem interna dos sistemas agroflorestais na fazenda 2	133
ANEXO A – Folder informativo SAF-Dendê	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Histórico de aplicação de fertilizantes e calcário em sistemas agroflorestais baseados em palmeira de óleo em Tomé-Açu, na Amazônia oriental, Brasil.	33
Tabela 2 Área relativa (%) ocupada por cada zona de manejo nos sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil.	38
Tabela 3 Análise de deviance (Teste tipo II) dos indicadores de saúde do solo em diferentes.	39
Tabela 4 Histórico de aplicação de fertilizantes e calcário em sistemas agroflorestais baseados em palmeira de óleo em Tomé-Açu, na Amazônia oriental, Brasil.	66
Tabela 5 Caracterização química e granulométrica dos solos em diferentes sistemas de cobertura do solo em Tomé-Açu, na Amazônia Oriental, Brasil.	68
Tabela 6 Espécies vegetais consorciadas com a palma de óleo em sistemas agroflorestais em três fazendas em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....	69
Tabela 7 Área relativa (%) ocupada por cada zona de manejo nos sistemas de produção de palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil.	69
Tabela 8 Tabela de análise de deviance (teste do Tipo II) dos indicadores de saúde do solo nos sistemas de cobertura do solo (monocultivo, sistema agroflorestal e floresta).	72
Tabela 9 Tabela de análise de deviance (teste do Tipo II) dos indicadores de saúde do solo nas zonas de manejo (carreador, área de coroamento e empilhamento) dos sistemas de cultivo da palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo).....	73
Tabela 10 Tabela de análise de deviance (teste do Tipo II) dos indicadores de saúde do solo entre os sistemas de cultivo de palma de óleo (SAF e monocultivo) em cada zona de manejo (CAR, ACP e PIL).....	76
Tabela 11 Histórico de uso das fazendas, técnica de preparo da área para plantio dos sistemas de cultivo de palma de óleo e área de referência.	100
Tabela 12 Espécies vegetais consorciadas com a palma de óleo em sistemas agroflorestais em três fazendas em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....	101
Tabela 13 Histórico de aplicação de fertilizantes e calcário em sistemas agroflorestais baseados em palmeira de óleo em Tomé-Açu, na Amazônia oriental, Brasil.	103
Tabela 14 Área relativa (%) ocupada por cada zona de manejo nos sistemas de produção de palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil.	105

Tabela 15 Tabela de análise de deviance (testes do Tipo II) do carbono oxidável por permanganato (CPOX) e carbono orgânico do solo (COS) entre dois anos de coleta em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental.	107
Tabela 16 Tabela de análise de deviance (teste do Tipo II) do incremento em carbono oxidável por permanganato (CPOX) e em carbono orgânico do solo (COS) em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental.	108
Tabela 17 Tabela de análise de deviance (testes do Tipo II) do carbono oxidável por permanganato (CPOX) e carbono orgânico do solo (COS) entre dois anos de coleta nas zonas de manejo em sistemas agroflorestais e monocultivos com palma de óleo na Amazônia oriental.	110
Tabela 18 Os incrementos de CPOX (Figura 5A e B) e COS (Figura 5C e D) não variaram entre as zonas de manejo dentro dos sistemas.	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de localização da área de estudo – A, vista aérea da fazenda – B, locais de coleta de solo em dois sistemas agroflorestais com palma de óleo: sistema agroflorestal menos diversificado (SAF-A) – C e sistema agroflorestal mais diversificado (SAF-B) – D. ACP – área de coroamento da palma de óleo, CAR – carreador, PIL – empilhamento e DIV – faixa diversificada, Brasil.....	32
Figura 2 Indicadores de saúde química e biológica do solo: teor de carbono orgânico do solo (COS) – A, carbono do solo oxidável por permanganato (CPOX) – B, carbono orgânico particulado (COP) – C, matéria orgânica do solo (MOS) – D, pH do solo (pH CaCl ₂) – E, cálcio (Ca) – F, magnésio (Mg) – G, potássio (K) – H, fósforo (P) – I, alumínio (Al) – J, estoque de raízes (RAIZ) – K, estoque de carbono orgânico do solo (Estoque de COS) – L em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta em regeneração na Amazônia oriental, Brasil. Letras diferentes indicam diferença significativa em cada camada do solo baseado na análise de contraste.....	41
Figura 3 Indicadores de saúde física do solo: densidade do solo (DS) – A e diâmetro médio ponderado (AGREG) – B em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta em regeneração na Amazônia oriental, Brasil.....	42
Figura 4 Correlação de Pearson entre os indicadores de saúde do solo em todas as camadas do solo (0-30 cm) em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta em regeneração na Amazônia oriental, Brasil.....	43
Figura 5 Dimensões do espaço multivariado dos indicadores de saúde do solo nas camadas 0-10 cm – A, B 10-20 cm – B e C 20-30 cm – C em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta em regeneração na Amazônia oriental, Brasil.....	45
Figura 6 Mapa de localização das fazendas em Tomé-Açu.....	64
Figura 7 Locais de coleta nos sistemas agroflorestais com palma de óleo.....	70
Figura 8 Ilustração esquemática dos locais de coleta do delineamento aninhado.....	72
Figura 9 A Carbono orgânico total do solo (COT), B beta-glucosidase (Beta), C arylsulfatase (Aryl), D carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), E respiração microbiana (RM) e F matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes sistemas de cobertura do solo (monocultivo, sistema agroflorestal – SAF, floresta) em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre médias baseadas na análise de contraste. Barras são média ± erro padrão.....	73

Figura 10 A Carbono orgânico total do solo (COT), B beta-glucosidase (Beta), C arylsulfatase (Aryl), D carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), E respiração microbiana (RM) e F matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes zonas de manejo (caminho da colheita – CAR, área de coroamento da palma de óleo – ACP, empilhamento de folhas de palma de óleo – PIL e faixa diversificada – DIV) de sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-açu, Amazônia oriental, Brasil. Os valores em branco dentro das barras de erro representam as médias. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre médias baseadas na análise de contraste. Barras são média ± erro padrão..... 74

Figura 11 A Carbono orgânico total do solo (COT), B beta-glucosidase (Beta), C arylsulfatase (Aryl), D carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), E respiração microbiana (RM) e F matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes zonas de manejo (caminho da colheita – CAR, área de coroamento da palma de óleo – ACP e empilhamento de folhas de palma de óleo – PIL) de monocultivos de palma de óleo em Tomé-açu, Amazônia oriental, Brasil. Os valores em branco dentro das barras de erro representam as médias. Letras diferentes indicam diferenças significativas baseadas na análise de contraste. Barras são média ± erro padrão. 75

Figura 12 A Carbono orgânico total do solo (COT), B beta-glucosidase (Beta), C arylsulfatase (Aryl), D carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), E respiração microbiana (RM) e F matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes zonas de manejo (caminho da colheita – CAR, área de coroamento da palma de óleo – ACP e empilhamento de folhas de palma de óleo – PIL) de sistemas de cultivo de óleo em Tomé-açu, Amazônia oriental, Brasil. “*” Indica efeito significativo e “ns” indica efeito não significativo baseado no modelo linear misto. Barras são média ± erro padrão. 76

Figura 13 Variação percentual dos atributos químicos dos sistemas agroflorestais com palma de óleo em relação à floresta (A); das zonas de manejo (CAR, ACP e DIV) em relação a PIL no sistema agroflorestal -SAF (B) e no monocultivo (C). A linha vermelha representa o valor encontrado no solo da floresta e do empilhamento correspondem a 100%. SAF significa sistema agroflorestal..... 77

Figura 14 Correlação de Pearson entre carbono orgânico total do solo (COT), beta-glucosidase (β), arylsulfatase (Aryl), carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), respiração microbiana (RM) e matéria orgânica do solo (MOS) nos sistemas de cobertura do solo (monocultivo de palma de óleo, sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta) em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil. **representam efeito significativo ($p < 0.05$). 78

Figura 15 Mapa de localização das fazendas em Tomé-Açu (A), vista aérea da Fazenda 2 (B), locais de coleta nos sistemas agroflorestais com palma de óleo (C) e ilustração esquemática dos locais de coleta do delineamento aninhado (D).....	99
Figura 16 Carbono oxidável por permanganato (CPOX) e B – carbono orgânico do solo (COS) em dois anos de coleta em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental, Brasil. “*” Indica efeito significativo e “ns” indica efeito não significativo entre os anos de coleta em cada sistema de cobertura do solo baseado no modelo linear misto.....	107
Figura 17 Incremento em carbono oxidável por permanganato (CPOX) (A) e carbono orgânico do solo (COS) (B) em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental, Brasil. Letras diferentes indicam efeito significativo entre os sistemas de cobertura do solo baseado no modelo linear misto.	108
Figura 18 Carbono oxidável por permanganato (CPOX) em zonas de manejo de sistemas agroflorestais com palma de óleo (A) e monocultivos de palma de óleo (B) e carbono orgânico total (COS) em zonas de manejo de sistemas agroflorestais com palma de óleo (C) e monocultivos de palma de óleo (D) em dois anos de coleta na Amazônia oriental, Brasil. “*” indica efeito significativo e “ns” indica efeito não significativo entre anos de coleta em cada sistema de cultivo de palma de óleo baseado no modelo linear misto.	109
Figura 19 Incremento no carbono oxidável por permanganato (CPOX) em zonas de manejo dos sistemas agroflorestais com palma de óleo (A) e monocultivos de palma de óleo (B) e incremento no carbono orgânico do solo (COS) em zonas de manejo dos sistemas agroflorestais com palma de óleo (C) e monocultivos de palma de óleo (D) na Amazônia oriental, Brasil. Letras diferentes indicam efeito significativo entre os incrementos nas zonas de manejo do sistemas de cultivo de palma de óleo baseado no modelo linear misto.....	110
Figura 20 Correlação de Pearson entre carbono oxidável por permanganato (CPOX) e carbono orgânico do solo (COS) em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental, Brasil.	112

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ACP – Área de coroamento da palma de óleo

AGREG – Diâmetro médio ponderado/ Estabilidade de agregados

Al – Alumínio

Aryl – Arylsulfatase

Beta – Beta-glucosidase

BioAS- BioAnálise do solo

C – Carbono do solo

Ca – Cálcio

CAR – carreador/caminho da colheita

COP – Carbono orgânico particulado

CPOX- Carbono oxidável por permanganato de potássio

COT – Carbono orgânico total do solo

DIV – Faixa diversificada

DS – Densidade do solo

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FOR – Floresta

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

K – Potássio

Mg – Magnésio

MON – Monocultivo de palma de óleo

MOS – Matéria orgânica do solo

P – Fósforo

pH – Potencial hidrogeniônico

PIL – Empilhamento de folhas podadas de palma de óleo

PNPB – Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

PPSPO – Produção de Produção de Sustentável de Palma de Óleo

Qui-q – Teste Qui-Quadrado

RAIZ – Estoque de raízes

RM – Respiração microbiana

SAF – Sistema agroflorestal

SAFs – Sistemas agroflorestais

SAF-A – Sistema agroflorestal menos diversificado

SAF-B – Sistema agroflorestal menos diversificado

ZAE – Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo

ZM – Zona de manejo

RESUMO

Sistemas agroflorestais (SAFs) são reconhecidos por promover melhoria da saúde e aumento do estoque de carbono (C) do solo. Na região Amazônica, SAFs com palma de óleo têm sido cultivados como estratégia produtiva e de recuperação de áreas degradadas. No primeiro capítulo, avaliamos dois SAFs com palma de óleo que diferem no nível de diversidade de espécies: maior diversidade (SAF-B) e menor diversidade (SAF-A). Usamos uma floresta em regeneração (FOR) como referência. Nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm do solo, avaliamos indicadores químicos: acidez ativa (pH), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), alumínio (Al); (b) indicadores físicos: densidade (DS) e estabilidade de agregados (AGREG) e; (c) indicadores biológicos: carbono oxidável por permanganato (CPOX), carbono orgânico particulado (COP), teor e estoque de carbono orgânico do solo (COS) e estoque de raízes (RAIZ). Os valores dos indicadores biológicos na camada 0-10 cm, especialmente os indicadores de C, foram mais altos nos SAFs do que na floresta, encontramos o mesmo padrão para os indicadores químicos. Os indicadores físicos não apresentaram um padrão específico de variação; a AGREG foi maior na floresta do que nos SAFs em no perfil do solo e densidade foi maior no SAF-B e FOR em comparação ao SAF-A em 20-30 cm. Portanto, os SAFs com palma de óleo melhoram a saúde química e biológica do solo, especialmente nas camadas mais superficiais, mas não melhoram a saúde física do solo em relação à floresta. No segundo capítulo, avaliamos a atividade das enzimas Betaglucosidase (Beta) e Arylsulfatase (Aryl), CPOX, respiração microbiana (RM), matéria orgânica do solo (MOS) e COS em três sistemas de cobertura do solo (SAF com palma de óleo, monocultivo de palma de óleo e floresta) e nas zonas de manejo (ZM) dos sistemas de palma de óleo (carreador-CAR, área de coroamento da palma de óleo-ACP, empilhamento de folhas-PIL e faixa diversificada-DIV). Encontramos melhores níveis desses indicadores de saúde do solo nos SAFs em comparação a floresta e monocultivo; e níveis superiores na PIL, intermediários na DIV e ACP e inferiores no CAR. Nossos resultados para COS, Beta, Aryl e CPOX indicam que SAFs promovem melhor saúde do solo em comparação com o monocultivo e a floresta. Esses indicadores mostram que as ZM com maior aporte de C (PIL, DIV e ACP) melhoram a saúde do solo. Em geral, Beta, Aryl, CPOX e COS foram mais sensíveis que RM e MOS para diferenciar os sistemas de cobertura do solo e as ZM. No terceiro capítulo, avaliamos o incremento de CPOX e COS entre 2018 e 2022 nos SAFs, monocultivo e floresta; e nas ZM. Nossos resultados para CPOX e COS mostram

que os SAFs apresentam maior incremento na saúde do solo a curto prazo em comparação ao monocultivo. Em relação às ZM, as zonas dos SAFs apresentaram incremento em CPOX e COS, diferente do monocultivo, onde a saúde do solo das ZM não mudou ou decresceu. De modo geral, o CPOX foi mais sensível para identificar diferenças nos incrementos da saúde do solo nos sistemas de cobertura do solo e nas zonas de manejo. A associação da adubação orgânica com a diversidade de espécies nos SAFs foi a principal responsável pelo incremento de curto prazo na saúde do solo nesse sistema em comparação ao monocultivo. Apesar dos resultados positivos para os SAFs, mais pesquisas são necessárias para avaliar mudanças de longo prazo na saúde do solo nesses sistemas de cultivo, visto que o ciclo de plantio da palma de óleo dura aproximadamente 25 anos. Contudo, nossos resultados sugerem que o cultivo de palma de óleo em SAFs pode ser uma alternativa mais sustentável que o monocultivo e tem grande potencial para incrementar a saúde do solo.

Palavras-chave: carbono lábil do solo; dendezeiro; qualidade do solo; solo degradado.

ABSTRACT

Agroforestry systems (AFS) are generally recognized for enhancing soil health and increasing soil carbon (C) stocks. In the Amazon region, AFS with oil palm have been cultivated as a productive strategy and for the recovery of degraded areas. In the first chapter, we evaluated two AFS with oil palm that differ in species diversity: higher diversity (AFS-B) and lower diversity (AFS-A). A regenerating forest (FOR) was used as a reference. In the 0-10, 10-20, and 20-30 cm soil layers, we evaluated chemical indicators: active acidity (pH), calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), phosphorus (P), aluminum (Al); (b) physical indicators: soil density (SD) and aggregate stability (AGG); and (c) biological indicators: permanganate oxidizable carbon (POXC), particulate organic carbon (POC), total soil organic carbon content and stock (SOC), and root stock (ROOT). The values of the biological indicators in the 0-10 cm layer, especially the C indicators, were higher in the AFS than in the forest, and we found the same pattern for the chemical indicators. The physical indicators did not show a specific variation pattern; AGG was higher in the forest than in the AFS across the soil profile, and density was higher in AFS-B and FOR compared to AFS-A in the 20-30 cm layer. Therefore, AFS with oil palm improve the chemical and biological health of the soil, especially in the more superficial layers, but do not improve the physical health of the soil compared to the forest. In the second chapter, we evaluated the activity of the enzymes β -glucosidase (Beta) and arylsulfatase (Aryl), POXC, microbial respiration (MR), soil organic matter (SOM), and SOC in three ground cover systems (AFS with oil palm, oil palm monoculture, and forest) and in the management zones (MZ) of the oil palm production systems (pathway - CAR, area around the oil palm crown - ACP, leaf pile - PIL, and diversified strip - DIV). We found higher levels of these soil health indicators in the AFS compared to the forest and monoculture; and superior levels in PIL, intermediate in DIV and ACP, and lower in CAR. Our results for SOC, Beta, Aryl, and POXC indicate that AFS promote better soil health compared to monoculture and forest. These indicators show that MZ with higher C input (PIL, DIV, and WED) improve soil health. In general, Beta, Aryl, POXC, and SOC were more sensitive than MR and SOM to differentiate the ground cover systems and MZ. In the third chapter, we evaluated the increase of POXC and SOC between 2018 and 2022 in AFS, monoculture, and forest, and in MZ. Our results for POXC and SOC show that AFS present a greater short-term increase in soil health compared to monoculture. Regarding the MZ, the zones of the AFS

showed an increase in POXC and SOC, unlike the monoculture, where the soil health of the MZ did not change or decreased. Overall, POXC was more sensitive in identifying differences in soil health increments in the ground cover systems and MZ. The combination of organic fertilization with species diversity in AFS was the main factor responsible for the short-term increase in soil health in this system compared to monoculture. Despite the positive results for AFS, further research is needed to evaluate long-term changes in soil health in these cropping systems, given that the oil palm planting cycle lasts approximately 25 years. However, our results suggest that cultivating oil palm in AFS can be a more sustainable alternative to monoculture and has great potential to enhance soil health.

Keywords: degraded soil; labile soil carbon; oil palm; soil quality

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.,) pertence à família Arecaceae. Há especulações de que as primeiras sementes dessa palmeira tenham sido trazidas para o território brasileiro em 1500 por meio dos escravos (HOMMA, 2016). No entanto, somente a partir de meados do século XX o cultivo e estudo da palma de óleo ganharam destaque (HOMMA, 2016). Atualmente, o óleo de palma é utilizado com maior destaque no setor de biocombustíveis, embora também seja muito aplicado nos setores alimentício, cosmético, farmacêutico, químico e metalúrgico (BORGES; COLLICCHIO; CAMPOS, 2016).

A palma de óleo é, atualmente, a espécie oleaginosa de maior importância mundial (SHEIL et al., 2009), por apresentar maior produtividade entre as oleaginosas, atingindo até 3.8 toneladas por hectare (BRANDÃO, 2019), estando a frente da mamona e da soja, cujas produtividades são 700 e 500 quilogramas por hectare, respectivamente (EMBRAPA, 2016). Com 257 e 91 milhões de toneladas, a Indonésia e a Malásia, respectivamente, são os maiores produtores mundiais de palma de óleo, sendo responsáveis por cerca de 83,6% da produção global (FAO, 2021). A produção nacional de palma de óleo no Brasil, em 2021, foi estimada em 2,95 milhões de toneladas, o que torna o Brasil o oitavo maior produtor mundial (IBGE, 2022). O estado do Pará é responsável por cerca de 98% da produção nacional (IBGE, 2022); pois é favorecido pelo clima adequado ao cultivo e pela disponibilidade de terras agricultáveis (RAMALHO FILHO et al., 2010).

Estima-se que a área plantada com palma de óleo no território brasileiro seja 236 mil hectares; o estado do Pará contribui com 88% desta área, seguido por Bahia, com 11% e Roraima, com 1% (BRASIL, 2018). A demanda por óleo de palma é crescente e estima-se que em 2050 serão necessários mais 13 milhões de hectares de área plantada em todo o mundo (KUSS et al., 2015). A expansão do cultivo acontece, principalmente, em função de programas de incentivo de produção de óleo de palma para fins de geração de biocombustível (FARIAS, 2022; KUSS et al., 2015). Em 2005, foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) que tem como objetivo implementar a cadeia de produção do biodiesel no território brasileiro, visando a produção sustentável, inclusão social e geração de renda e emprego, por meio da utilização de oleaginosas que se adequem às realidades sociais, econômicas e ambientais de cada região do país (BRASIL, 2005).

Em 2010, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) elaborou o Zoneamento Agroecológico, Produção e Manejo para a Cultura da Palma de óleo na Amazônia (ZAE-Palma de óleo) como uma ferramenta de avaliação e espacialização de áreas aptas para produção sustentável da palma (RAMALHO FILHO et al., 2010). O ZAE identificou aproximadamente 130 mil km² de terras disponíveis para a expansão da palma de óleo no Brasil; e concluiu que a palma de óleo apresenta potencial para gerar lucros, promover o sequestro de carbono e proteger o solo contra erosão e degradação. Em complemento, o Governo Federal criou, em 2010, o Programa de Produção Sustentável da Palma de Óleo (PPSPO) que visa controlar a expansão do cultivo desordenado da palma de óleo (BRASIL, 2010), e desse modo, restringia essa expansão a terras degradadas e que foram desmatadas antes de 2008. Portanto, a partir do PPSPO, a conversão de florestas nativas para o cultivo de palma de óleo é proibida (BRASIL, 2010). Embora o PPSPO inicialmente tenha influenciado positivamente a expansão ordenada do cultivo de palma de óleo, estudos relatam a redução do apoio do Governo Federal para o sucesso desse programa (BRANDÃO, 2019; DA SILVA; TABARELLI; VIEIRA, 2023; FARIAS, 2022)

O PPSPO foi lançado no município de Tomé-Açu, no Nordeste Paraense. Nessa região, os sistemas produtivos de palma de óleo são predominantemente executados no molde convencional, isto é, monocultivo (ALMEIDA et al., 2020; BRASIL, 2018). Esse sistema de produção consiste em um ciclo de cultivo de 25 anos, mas somente a partir dos 10 anos de idade torna-se viável economicamente (GOH; NG; LEE, 2009; KUSS et al., 2015). A prática de monocultivo é baseada na elevada utilização de insumos industrializados, como fertilizantes e defensivos agrícolas, e maquinário agrícola, o que conflita com a realidade econômica da maioria dos produtores familiares da região amazônica (FARIAS, 2022; IPEA, 2013; KATO et al., 2011). Por isso, é necessário buscar sistemas de produção de palma de óleo que sejam viáveis economicamente para pequenas propriedades e que amenizem o impacto desse cultivo, em pequena ou grande escala, ao meio ambiente (KATO et al., 2011; MICCOLIS; VAN NOORDWIJK; AMARAL, 2021).

Dentro desse contexto, a introdução da cultura em sistemas agroflorestais (SAFs) se apresenta como uma solução promissora para amenizar os impactos ambientais do monocultivo (BHAGWAT; WILLIS, 2008; KHASANAH et al., 2020; KOH; LEVANG; GHAZOUL, 2009). Diversas iniciativas de diversificação do cultivo de palma de óleo são relatadas no Brasil e no mundo: 1) Programa de Biodiversidade e Função do Ecossistema

na Agricultura Tropical (Biodiversity and Ecosystem Function in Tropical Agriculture - BEFTA) conduzido em Sumatra, Indonésia (LUKE et al., 2020); 2) Funções ecológicas e socioeconômicas dos sistemas de transformação de florestas tropicais de várzea (Ecological and socio-economic functions of tropical lowland rainforest transformation systems – EFForTS-BEE) em Sumatra, Indonésia (TREEDIVNET, 2023); 3) SAF-Dendê: Inovação e sustentabilidade na Amazônia. O projeto SAF-Dendê foi implantado no município de Tomé-Açu, em 2008 e tem objetivo de desenhar um sistema diversificado de produção de palma de óleo garantindo a qualidade do solo, biodiversidade e a diversificação da renda de agricultores familiares (MICCOLIS; VAN NOORDWIJK; AMARAL, 2021; PARTNERSHIP FOR THE CONSERVATION OF AMAZON BIODIVERSITY, [s.d.]

Sistemas de cultivos perenes mais diversificados apresentam maior semelhança com a vegetação natural da Amazônia (floresta ombrófila densa), em termos de prestação de serviços ecossistêmicos (por exemplo o sequestro de carbono acima e abaixo do solo, melhoria da qualidade da água, ar e solo e preservação da biodiversidade) do que monocultivos (ALMEIDA; VIEIRA; FERRAZ, 2020; CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021). Na região Amazônica, a produtividade e permanência da vegetação nativa acontece em função da ciclagem de carbono e nutrientes, visto que os solos dessa região apresentam acidez elevada e baixa fertilidade natural (ARAGÃO et al., 2009; QUESADA et al., 2009). Portanto, sistemas de cultivo que interrompem ou reduzem drasticamente o aporte e a ciclagem de material orgânico para solo, tendem a ocasionar e acelerar o processo de degradação dos solos Amazônicos.

A degradação do solo pode ser analisada por meio de indicadores de saúde do solo. Esses indicadores são classificados em químicos (por exemplo o pH, Ca, Mg, Al, P e K), biológicos (por exemplo o carbono da biomassa microbiana do solo, respiração microbiana, matéria orgânica do solo, carbono orgânico particulado, atividade das enzimas do solo) e físicos (por exemplo a densidade do solo, porosidade, resistência do solo à penetração, estabilidade de agregados) (MOEBIUS-CLUNE et al., 2016; STOTT, 2019; USDA, 2015). O principal indicador da saúde do solo é o carbono orgânico do solo (COS), pois é fortemente correlacionado com todos os atributos do solo

O COS é composto por substâncias recalcitrantes e lábeis, desse modo classifica-se o carbono (C) do solo em fração de carbono recalcitrante e fração de carbono lábil. O C recalcitrante é maior porção do COS e é representado por substâncias com maior tempo de permanência no solo devido a sua baixa facilidade de decomposição (STROSSER,

2010). O carbono lábil é uma pequena porção, de 3 a 7% (GOMES et al., 2021), do COS e é definido como o C prontamente mineralizável, ou seja, que está facilmente sujeito ao ataque de microrganismos (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995; CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Devido à alta sensibilidade da fração lábil às alterações no uso do solo, essa fração é considerada excelente indicadora de saúde do solo (BAAH-ACHEAMFOUR et al., 2015; CHAN; BOWMAN; OATES, 2001(BAAH-ACHEAMFOUR et al., 2015; NIELSEN; WINDING, 2002)). O carbono lábil sofre alteração em função do clima, do tempo, da quantidade e qualidade de resíduo orgânico que é depositado sobre o solo (BENBI et al., 2015; BONGIORNO et al., 2019; BRUUN et al., 2013; DULAZI et al., 2022; GU et al., 2016).

Indicadores sensíveis de saúde do solo podem ser mais adequados que o COS para avaliar a variação espacial dentro de cultivos de palma de óleo (GOMES et al., 2021). Essa variação é resultado da heterogeneidade do manejo e da quantidade de material orgânico depositado sobre o solo. (FRAZÃO et al., 2013; GOMES et al., 2021; HARON et al., 1998; NELSON et al., 2015; NOIROT et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2022; RAHMAN et al., 2018). O monocultivo de palma de óleo pode ser dividido em três zonas de manejo: carreador (CAR), caminho para o tráfego de máquinas para colheita; área de coroamento da palma de óleo (ACP), onde são aplicados os defensivos agrícolas e fertilizantes da palmeira; o empilhamento (PIL), onde são depositadas as folhas podadas de palma de óleo. Os sistemas agroflorestais com palma de óleo desenvolvidos no município de Tomé-Açu, além das três zonas de manejo (CAR, ACP e PIL), incluem uma faixa diversificada (DIV) com espécies frutíferas, madeireiras e/ ou leguminosas (GOMES et al., 2021; KATO et al., 2011)

Em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia foram publicados estudos que tratam sobre: a fertilidade do solo (COSTA et al., 2023; DA SILVA et al., 2018), carbono abaixo (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021; RAMOS et al., 2018) e acima do solo (RAMOS et al., 2018), saúde física (OLIVEIRA et al., 2022) e biológica do solo (MAIA et al., 2021; SANTIAGO et al., 2013; SILVA et al., 2016). Portanto, há uma lacuna de conhecimento sobre os impactos do cultivo de palma de óleo e das zonas de manejo desses sistemas sobre indicadores de saúde do solo de maior sensibilidade, como as enzimas do solo, CPOX, carbono orgânico particulado, além da evolução temporal do C do solo. A necessidade de entendimento sobre a saúde do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo motivou a elaboração da seguinte pergunta:

Qual o efeito dos sistemas agroflorestais com palma de óleo sobre a saúde do solo em comparação a monocultivos de palma de óleo e florestas secundárias na Amazônia?

Para responder a essa pergunta foram testadas as seguintes hipóteses: 1) a saúde do solo será superior nos sistemas agroflorestais com palma de óleo, intermediária na floresta e inferior nos monocultivos; essa hipótese é baseada em estudos prévios que mostram que a fertilidade (COSTA et al., 2023) e carbono do solo (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021) nos SAF com palma de óleo são superiores aos demais sistemas de cobertura do solo; 2) Dentro dos SAFs com palma de óleo, a saúde do solo será superior no empilhamento, intermediário na faixa diversificada e na área de coroamento e inferior no carreador; essa hipótese é baseada em estudos prévios nas áreas estudadas (GOMES et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022) e em outras áreas de monocultivo de palma de óleo (FRAZÃO et al., 2013; RAHMAN et al., 2018; RÜEGG et al., 2019).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. S. et al. Heterogeneity of tree diversity and carbon stocks in Amazonian oil palm landscapes. **Plant Ecology and Diversity**, v. 13, n. 1, p. 105–113, 2020.
- ALMEIDA, A. S.; VIEIRA, I. C. G.; FERRAZ, S. F. B. Long-term assessment of oil palm expansion and landscape change in the eastern Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 90, p. 104321, 2020.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. **Biogeosciences**, v. 6, n. 12, p. 2759–2778, 2009.
- BAAH-ACHEAMFOUR, M. et al. Carbon pool size and stability are affected by trees and grassland cover types within agroforestry systems of western Canada. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 213, p. 105–113, 2015.
- BENBI, D. K. et al. Sensitivity of labile soil organic carbon pools to long-term fertilizer, straw and manure management in rice-wheat system. **Pedosphere**, v. 25, n. 4, p. 534–545, 2015.
- BHAGWAT, S. A.; WILLIS, K. J. Agroforestry as a solution to the oil-palm debate. **Conservation Biology**, v. 22, n. 6, p. 1368–1369, 2008.
- BONGIORNO, G. et al. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, v. 99, n. November 2018, p. 38–50, 2019.
- BORGES, A. DE J.; COLLICCHIO, E.; CAMPOS, G. A. A cultura da palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.) no Brasil e no mundo: aspectos agronômicos e

tecnológicos -uma revisão. **Revista Liberato**, v. 17, n. 27, p. 01–118, 2016.

BRANDÃO, F. **Oil Palm Expansion in The Brazilian Amazon: The challenge of reconciling conservation and development**. [s.l: s.n.].

BRASIL. **Law Number 7326** Brasília Diário Oficial da República Federativa do Brasil, , 2010.

BRASIL. **Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo**. Brasília: [s.n.].

BRUUN, T. B. et al. Improved sampling methods document decline in soil organic carbon stocks and concentrations of permanganate oxidizable carbon after transition from swidden to oil palm cultivation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 178, p. 127–134, 2013.

CARVALHO, W. R. et al. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 2, p. 357–368, 2014.

COSTA, L. R. DE J. et al. Soil fertility in oil palm agroforestry systems in the Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, n. 0123456789, 2023.

DA SILVA, C. S. et al. Spatial dependency and correlation of properties of soil cultivated with oil palm, *elaeis guineensis*, in agroforestry systems in the eastern Brazilian Amazon. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 4, p. 280–289, 2018.

DA SILVA, K. C. L.; TABARELLI, M.; VIEIRA, I. C. G. Oil palm plantations in an aging agricultural landscape in the eastern Amazon: Pushing Amazon forests farther from biodiversity-friendly landscapes. **Biological Conservation**, v. 283, n. July 2022, 2023.

DULAZI, A. A. et al. Soil organic carbon and its labile pools as modulated by soil microbes under different land use practices in Typic Ustochrepts. **Tropical Ecology**, v. 64, n. 2, p. 276–286, 2022.

FARIAS, A. L. A. DE. **O grande projeto da dendeicultura na Amazônia: impactos, conflitos e alternativas**. Belém: [s.n.].

FRAZÃO, L. A. et al. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 4, p. 384–390, 2013.

GOH, K. J.; NG, P. H. C.; LEE, C. T. Fertilizer management and productivity of oil palm in Malaysia. **AAR Newsletter**, p. 2–24, 2009.

GOMES, M. F. et al. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation and Development**, v. 32, n. 15, p. 4313–4326, 2021.

GU, C. et al. Dynamic changes of soil surface organic carbon under different mulching practices in citrus orchards on sloping land. **PLoS ONE**, v. 11, n. 12, p. 1–16, 2016.

HARON, K. et al. Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations, West Malaysia. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, n. 5, p. 547–552, 1998.

HOMMA. **Cronologia do Cultivo do Dendezeiro na Amazônia**, Belém, 2016.

- IPEA. *Marcha das Margaridas: perfil socioeconômico e condições de vida das mulheres trabalhadoras do campo e da floresta - Relatório de pesquisa*. 2013.
- KATO, O. R. et al. Projeto Dendê em Sistemas Agroflorestais na Agricultura Familiar. **Congresso Brasileiro De Sistemas Agroflorestais**, v. 8, n. 1, p. 7, 2011.
- KHASANAH, N. et al. Oil Palm Agroforestry Can Achieve Economic and Environmental Gains as Indicated by Multifunctional Land Equivalent Ratios. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, n. January, p. 1–13, 2020.
- KOH, L. P.; LEVANG, P.; GHAZOUL, J. Designer landscapes for sustainable biofuels. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 24, n. 8, p. 431–438, 2009.
- KUSS, V. V. et al. Potential of biodiesel production from palm oil at Brazilian Amazon. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1013–1020, 2015.
- LUKE, S. H. et al. Managing Oil Palm Plantations More Sustainably: Large-Scale Experiments Within the Biodiversity and Ecosystem Function in Tropical Agriculture (BEFTA) Programme. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, n. January, p. 1–20, 2020.
- MAIA, S. R. et al. Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. May, p. 731–740, 2021.
- MICCOLIS, A.; VAN NOORDWIJK, M.; AMARAL, J. Oil palm in Brazil: lessons from policies and agroforestry innovation. In: **Tree commodities and resilient green economies in Africa**. Nairobi, Kenya: [s.n.].
- MOEBIUS-CLUNE, B. N. et al. **Comprehensive assessment of soil health - The Cornell framework manual**. [s.l: s.n.].
- NELSON, P. N. et al. Soil sampling in oil palm plantations: a practical design that accounts for lateral variability at the tree scale. **Plant and Soil**, v. 394, n. 1–2, p. 421–429, 2015.
- NIELSEN, M. N.; WINDING, A. **Microorganisms as indicators of soil health**. [s.l: s.n.]. v. NERI Techn
- NOIROT, L. M. et al. Impacts of empty fruit bunch applications on soil organic carbon in an industrial oil palm plantation. **Journal of Environmental Management**, v. 317, n. October 2021, 2022.
- OLIVEIRA, R. L. L. et al. Management practices affect soil carbon and physical quality in oil palm agroforestry systems in the Amazon. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, n. 0123456789, 2022.
- PARTNERSHIP FOR THE CONSERVATION OF AMAZON BIODIVERSITY. **Production of Palm Oil “Dendê” in an Agroforestry System: Innovation and Sustainability**. Disponível em: <<https://pcabhub.org/en-us/about/projects/dende-palm-oil-diversification-reconciling-livelihood-with-conservation-in-the-production-of-dende-palm-oil>>.
- QUESADA, C. A. et al. Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties.

Biogeosciences Discussions, v. 6, n. 2, p. 3993–4057, 2009.

RAHMAN, N. et al. Changes in soil organic carbon stocks after conversion from forest to oil palm plantations in Malaysian Borneo. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 10, 2018.

RAMALHO FILHO, A. et al. **Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia**. [s.l: s.n.]. v. 1

RAMOS, H. M. N. et al. Above- and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 221–237, 2018.

RÜEGG, J. et al. Drivers of soil carbon stabilization in oil palm plantations. **Land Degradation & Development**, n. May, p. 1–12, 2019.

SANTIAGO, W. R. et al. Nitrogênio mineral e microbiano do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 4, p. 395–405, 2013.

SILVA, C. M. et al. Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 1, p. 1–12, 2016.

STOTT, D. E. Recommended Soil Health Indicators and Associated Laboratory Procedures. **Soil Health Technical Note No. 450-03**, n. 450, p. 76, 2019.

STROSSER, E. Methods for determination of labile soil organic matter: An overview. **Journal of Agrobiology**, v. 27, n. 2, p. 49–60, 2010.

TREEDIVNET. **EFForTS-BEE (Indonesia)**. Disponível em:
<<https://treedivnet.ugent.be/ExpEFForTSBEE.html>>.

USDA. Soil quality indicators : Biological indicators and soil functions. **USDA Natural Resources Conservation Service**, n. April, p. 1–4, 2015.

2 INDICADORES DE SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL

Artigo publicado na Revista Geoderma Regional em 23/05/2024

Durante a tradução para português deste capítulo, a autora utilizou o ChatGPT em 29/05/2024. A autora revisou e editou o conteúdo conforme necessário e assume total responsabilidade pelo conteúdo da publicação.

RESUMO

Os sistemas agroflorestais (SAFs) são geralmente reconhecidos por melhorar a saúde do solo e aumentar o estoque de carbono (C) do solo. Na região Amazônica, SAFs com palma de óleo têm sido promovidos como uma estratégia produtiva e podem oferecer o benefício adicional de recuperar áreas degradadas. Nosso objetivo foi avaliar se as práticas de manejo adotadas em SAFs com palma de óleo afetam os indicadores de saúde do solo e o estoque de C. Realizamos um estudo em Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental, no qual avaliamos dois SAFs com palma de óleo que diferem em diversidade de espécies: maior diversidade (SAF-B) e menor diversidade (SAF-A). Usamos uma floresta em regeneração (FOR) como comparação com os SAFs com palma de óleo, uma vez que florestas em regeneração também são um modelo de recuperação ambiental na Amazônia Oriental. Nas camadas de solo de 0-10, 10-20 e 20-30 cm, avaliamos indicadores químicos (acidez ativa (pH), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P) e alumínio (Al)), indicadores físicos (densidade (DS) e estabilidade de agregados (AGREG)) e indicadores biológicos (carbono oxidável por permanganato (CPOX), carbono orgânico particulado (COP), teor de carbono orgânico do solo (COS) e estoque de raízes (RAIZ)). Também avaliamos o estoque total de carbono do solo (estoque de COS). Os valores dos indicadores biológicos na camada mais superficial, especialmente os indicadores de C, foram maiores no SAF-A (teor de C: $1,63 \pm 0,13\%$, CPOX: $568 \pm 17 \text{ mg kg}^{-1}$, COP: $0,63 \pm 0,10 \text{ g kg}^{-1}$) e no SAF-B (teor de C: $1,84 \pm 0,04\%$, CPOX: $656 \pm 24 \text{ mg kg}^{-1}$, COP: $0,83 \pm 0,06 \text{ g kg}^{-1}$) do que na FOR (teor de C: $1,35 \pm 0,09\%$, CPOX: $336 \pm 10 \text{ mg kg}^{-1}$, COP: $0,44 \pm 0,03 \text{ g kg}^{-1}$). Em geral, os valores dos indicadores químicos foram maiores nos SAFs do que na FOR, exceto para o teor de Al, que foi maior na FOR do que nos SAFs. Os indicadores físicos não mostraram um padrão específico de variação entre os SAFs e a FOR; a estabilidade de agregados foi maior na FOR (variação ao longo do perfil do solo: $5,57 \pm 0,09$ a $5,38 \pm 0,24 \text{ mm}$) do que no SAF-

A ($5,41 \pm 0,03$ a $3,79 \pm 0,07$ mm) e no SAF-B ($5,07 \pm 0,01$ a $3,79 \pm 0,11$ mm) em todas as camadas do solo, e a densidade do solo foi maior no SAF-A e na FOR do que no SAF-B na maioria das camadas subsuperficiais. Portanto, os SAFs com palma de óleo melhoram a saúde química e biológica do solo, especialmente nas camadas mais superficiais, mas não melhoram a saúde física do solo quando comparados à floresta.

Palavras-chave: qualidade do solo; carbono lábil do solo; solo degradado.

2.1 Introdução

Um sistema agroflorestal (SAF) consiste na combinação de pelo menos uma espécie madeireira com espécies agrícolas, pastagens e animais (SOMARRIBA, 1992). Esses sistemas são reconhecidos por sua capacidade de gerar benefícios ecológicos, econômicos e sociais (NAIR; KUMAR; NAIR, 2009). Os SAFs são considerados pela Organização das Nações Unidas como uma ferramenta estratégica para alcançar o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 15, que está relacionado à restauração de ecossistemas terrestres e à reversão da degradação do solo. Os SAFs também têm sido considerados uma alternativa que pode ser explorada para alcançar as metas da agenda da Década das Nações Unidas sobre Restauração de Ecossistemas (2021–2030).

A melhoria da saúde do solo está entre os benefícios ecológicos que os SAFs podem promover e que são relevantes para a restauração de ecossistemas (DOLLINGER; JOSE, 2018; MUCHANE et al., 2020). A saúde do solo é determinada por vários indicadores da capacidade do solo de desempenhar suas funções ecossistêmicas. Iniciativas para padronizar um conjunto mínimo de indicadores para análise da saúde do solo têm sido propostas (FINE; SCHINDELBECK, 2017; HANEY et al., 2018; MOEBIUS-CLUNE et al., 2016; STOTT, 2019; USDA, 2015a). Os protocolos atuais para avaliação da saúde do solo incluem indicadores químicos (pH, Ca, Mg, P, K, Al e carbono oxidável por permanganato), físicos (densidade e estabilidade de agregados) e biológicos (raízes, carbono orgânico do solo e carbono orgânico particulado do solo). O carbono orgânico do solo (COS) é geralmente considerado o principal indicador da saúde do solo porque está fortemente associado à agregação do solo, metabolismo microbiano e ciclagem de nutrientes, especialmente em solos tropicais (TURMEL et al., 2015).

Na região amazônica, a maioria dos solos possui baixa fertilidade natural. Assim, a alta produtividade das florestas nativas dessa região depende fortemente dos nutrientes

liberados por meio da ciclagem da matéria orgânica do solo (ARAGÃO et al., 2009; FAGERIA; BALIGAR, 2008; QUESADA et al., 2009, 2011). A interrupção da ciclagem da matéria orgânica do solo pode levar à degradação do solo, que é geralmente observada quando florestas nativas são convertidas em sistemas agrícolas (BRIEDIS et al., 2023; GMACH et al., 2018; SAHU; MISHRA; BASTI, 2023). Na região amazônica, uma quantidade significativa de floresta primária foi convertida em pastagens e agricultura de corte e queima (BARONA et al., 2010). Ambos os tipos de uso da terra geralmente degradam o solo e não são sustentáveis a longo prazo (MENDES et al., 2015; PEDRINHO et al., 2019). Áreas degradadas apresentam baixos estoques de carbono e biodiversidade reduzida e são inadequadas para o cultivo agrícola (Brasil, 1981; FAO, 2024; INPE, 2024).

A regeneração natural de áreas degradadas na Amazônia forma florestas secundárias (PUTZ; REDFORD, 2010) com diferentes níveis de diversidade. Dependendo do uso e intensidade do manejo anterior do solo, as florestas secundárias podem apresentar variados graus de provisão de serviços ecossistêmicos (JAKOVAC et al., 2015; MESQUITA et al., 2015). Embora não haja consenso sobre a rapidez e a extensão da recuperação das funções ecossistêmicas das florestas secundárias, essas florestas desempenham um papel essencial na restauração dos serviços ecossistêmicos ligados à ciclagem de nutrientes, sequestro de carbono, qualidade do solo e biodiversidade (FOLEY et al., 2007; PEDRINHO et al., 2019). No entanto, as florestas secundárias não são reconhecidas por gerar lucros para os proprietários de terras; de fato, o retorno econômico é uma questão crítica para promover a restauração de terras degradadas pelos proprietários. Assim, sistemas agrícolas sustentáveis podem representar uma opção viável para a recuperação de áreas degradadas na Amazônia, pois esses sistemas proporcionam benefícios econômicos e ambientais.

Sistemas agrícolas diversificados (como os sistemas agroflorestais) geralmente promovem maiores benefícios ambientais e capacidade de restauração. Recentemente, sistemas diversificados com o plantio de palmas de óleo têm recebido grande atenção (FUTEMMA; DE CASTRO; BRONDIZIO, 2020; LUKE et al., 2020; MICCOLIS et al., 2016; TREEDIVNET, 2023) em várias regiões devido à importância da palma de óleo como uma commodity extremamente relevante. Assim, cultivar palma de óleo em sistemas agroflorestais pode ser uma opção viável que combina benefícios ambientais e econômicos (ASMAH et al., 2017; ATIQAHA et al., 2019; GÉRARD et al., 2017; KHASANAH et al., 2020; MASURE et al., 2023; TEUSCHER et al., 2016). De fato,

vários estudos têm demonstrado os benefícios ambientais dos SAFs com palma de óleo, mas há poucos estudos sobre a saúde do solo, que é um indicador relevante. Além disso, ainda menos estudos compararam a saúde do solo em SAFs com palma de óleo e em florestas secundárias, e os que fizeram mostraram resultados contraditórios (BESAR et al., 2020; CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021; SHUHADA et al., 2020); a comparação de um sistema agrícola com a vegetação original ajuda a avaliar melhor os impactos da conversão de floresta em agricultura e o potencial de cada sistema para restaurar a saúde do solo.

Em nossa área experimental (CARVALHO et al., 2014), a preparação do terreno envolveu corte e trituração de um fragmento de regeneração florestal. Assim, as áreas agroflorestais receberam uma quantidade considerável de carbono e nutrientes inicialmente. O manejo posterior do solo nas áreas agroflorestais com palma de óleo incluiu calagem e adubação orgânica. Esse manejo conservacionista das áreas agroflorestais com palma de óleo pode ter melhorado a qualidade química e biológica do solo em comparação com a regeneração florestal original (CARVALHO et al., 2014; COSTA et al., 2023; GOMES et al., 2021). Diferentemente dos SAFs, o tráfego de máquinas e humanos para colheita e manutenção do sistema não ocorre durante a regeneração florestal. Assim, nossa hipótese é que solos sujeitos à regeneração natural da floresta apresentam melhor saúde física do solo do que solos em SAFs. Nossa segunda hipótese é que SAFs possuem melhor qualidade química e biológica do que florestas. Nosso objetivo foi avaliar se as práticas de manejo adotadas em SAFs com palma de óleo afetam os indicadores de saúde do solo na Amazônia Oriental.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em uma pequena propriedade localizada no município de Tomé-Açu, no estado do Pará, Brasil (02°20'54"S, 48°15'44"W) (Figura 1A). Investigamos três sistemas de cobertura do solo: dois sistemas agroflorestais (SAFs) com palma de óleo de 10 anos e uma floresta em processo de regeneração de aproximadamente 20 anos (FOR) (Figura 1B). O clima da região é caracterizado como Am, de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é de 2300 mm e a temperatura média anual é de 26,8 °C. O mês mais chuvoso é março e o

mês menos chuvoso é setembro. Latossolos Amarelos (Oxisols, de acordo com a classificação do USDA, Soil Survey Staff, 2014) predominam na região (RODRIGUES et al., 2001) e são caracterizados por alta acidez e baixa fertilidade natural. A vegetação natural da região é floresta ombrófila densa; atualmente, prevalecem florestas em diferentes estágios de regeneração (ALMEIDA; VIEIRA; FERRAZ, 2020a; MATRICARDI et al., 2020).

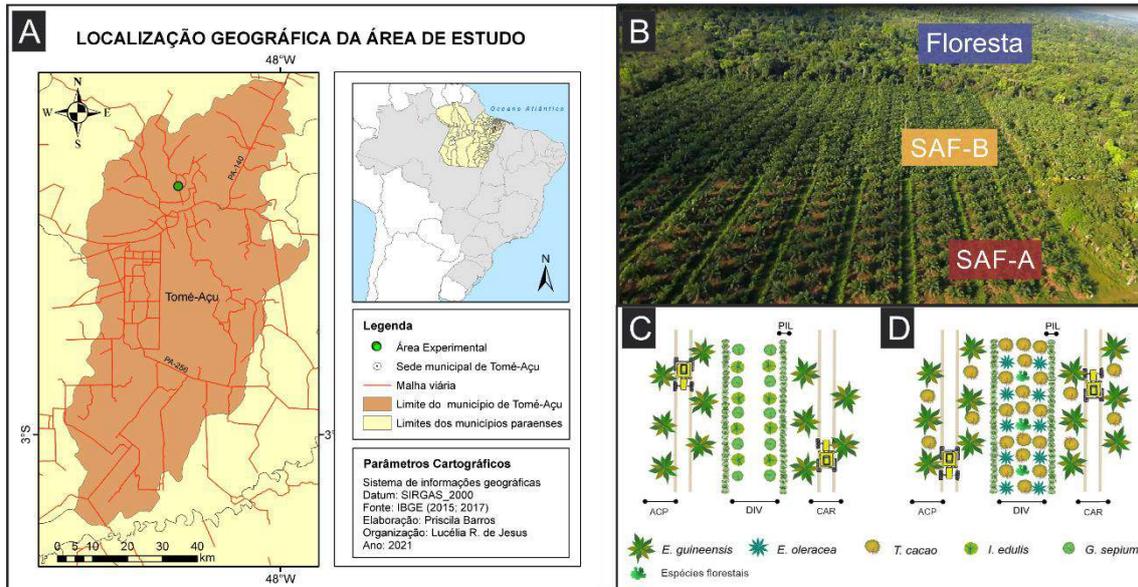


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo – A, vista aérea da fazenda – B, locais de coleta de solo em dois sistemas agroflorestais com palma de óleo: sistema agroflorestal menos diversificado (SAF-A) – C e sistema agroflorestal mais diversificado (SAF-B) – D. ACP – área de coroamento da palma de óleo, CAR – carreador, PIL – empilhamento e DIV – faixa diversificada, Brasil.

2.2.2 Implantação e manejo dos sistemas agroflorestais

Os SAFs foram implantados em uma área de floresta que vinha se regenerando por aproximadamente 10 anos. Em 2007, a floresta em regeneração foi cortada mecanicamente e picada. A área de cada SAF era de 2 hectares. Antes do plantio em 2008, foram aplicados $1,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico para corrigir a acidez do solo. Uma combinação de $0,3 \text{ kg}$ de fosfato natural reativo de Arad e 10 kg de carvão moído foi aplicada nas covas de plantio das palmeiras de óleo e das outras espécies. Mais detalhes sobre o manejo na implementação dos SAFs podem ser encontrados em estudos anteriores (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021; MAIA et al., 2021), e o regime de adubação de manutenção está mostrado na Tabela 1.

Os SAFs eram compostos por linhas duplas de palma de óleo intercaladas com faixas diversificadas (DIV). Os SAFs diferiam de acordo com a diversidade de espécies presentes nas faixas diversificadas (Figura 1C e D). O SAF mais diverso (SAF-B) era composto por árvores frutíferas (*Theobroma cacao* L., *Euterpe oleracea* Mart., *Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng) e *Mangifera indica* L.) e madeiras (*Acacia mangium* Willd., *Adenanthera pavonina* L., *Calophyllum brasiliense* Cambess., *Carapa guianensis* Aubl., *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don, *Oenocarpus mapora* H. Karsten, *Sclerolobium paniculatum*, *Spondias lutea* L. e *Tabebuia* sp.). A faixa diversificada no SAF menos diversificado (SAF-A) era composta por *Gliricidia sepium* e *Inga edulis*.

Tabela 1 Histórico de aplicação de fertilizantes e calcário em sistemas agroflorestais baseados em palmeira de óleo em Tomé-Açu, na Amazônia oriental, Brasil.

Calcário / fertilizante	Unidade	Área de coroamento da palma de óleo											Faixa diversificada		
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2008	2017	2018
Calcário dolomítico ^d	kg ha ⁻¹												1300 ^b		2067 ^a
Fosfato natural de ARAD ^e	kg planta ⁻¹	0.3		1	1.5						0.7	2.5	0.3 ^a	0.7 ^a	2.5 ^a
Moinha de carvão ^f	kg planta ⁻¹	10											10 ^b		
Cama de frango ^g	kg planta ⁻¹												10 ^b		
Farinha de ossos ^h	kg planta ⁻¹		1	0.5	0.5										
Torta de mamona ⁱ	kg planta ⁻¹		2	2	4										
Torta de dendê ^j	kg planta ⁻¹								30	30	40		30 ^a	40 ^a	
FTE BR12 ^k	kg planta ⁻¹			0.3	0.2										
Cachos vazios de palma de óleo ^l	kg planta ⁻¹			100	221	150	200	240	240						
Bórax ^m	kg planta ⁻¹	10		0.1											
Composto orgânico ⁿ	kg planta ⁻¹		40										40 ^b		
Yoorin ^o	kg planta ⁻¹								1.5						

Produtor 10 ^p	kg planta ⁻¹					0.1	0.15	0.1 ^c	
Polissulfato de potássio ^q	kg planta ⁻¹					2.6	9	2.6 ^a	9 ^a
Sulfato de potássio ^r	kg planta ⁻¹	40				0.8	0.8	0.4	1.8

^a *Theobroma cacao* e *Euterpe oleracea*;

^b Fertilizante aplicado em toda faixa;

^c *Euterpe oleracea*;

^d Mg: 12%; Ca: 38%

^e P: 10%; Ca: 37%

^f K: 5.9%; Mg: 2.8%; Ca: 15.40%

^g N: 2.58%; P: 2.27%; K: 2.31%; Mg: 0.44%; Ca: 30%

^h N: 2%; P: 20%; K: 0.12%; Mg: 0.24%; Ca: 30%

ⁱ N: 5.44%; P: 1.91%; K: 1.54%; Mg: 0.5%; Ca: 1.8%

^j N: 2.4%; P: 0.56%; K: 0.61%; Mg: 0.01%; Ca: 4%; S: 0.4%; Zn:

0.01%; B: 0.05%

^k B: 1.8 %; Cu: 0.85%; Mn: 2.0%; Zn: 9.0%; S: 3.9%

^l N: 0.33%; P: 0.04%; K: 0.55%; Mg: 0.09%; Ca: 0.28 %; S: 0.04%

^m B: 20.8%; B₂O₃: 67%

ⁿ N: 0.80%; P: 0.40%; K: 0.30%; Mg: 0.10%; Ca: 0.23%; S: 0.03%

^o P: 16%; Mg: 7%; Ca: 18%; S: 6%; Zn: 0.55%; B: 0.1%

^p B: 10%

^q K: 14.0%; Mg: 3.5%; Ca: 12%; S: 19%

^r K: 50%; S: 18%

Fonte: Alessa Mendanha, 2018.

As palmeiras foram plantadas em um arranjo triangular equilátero (9,0 × 9,0 × 9,0 m) em filas duplas de aproximadamente 7,5 m de largura (entrelinhas); nelas estão presentes zonas de manejo características das plantações de palma de óleo: a) caminho de colheita (CAR), uma área por onde os tratores usados para colher os cachos podem passar; b) área de coroamento do palma de óleo (ACP), onde são aplicados fertilizantes, essa área abrange um raio de aproximadamente 1,5 m do tronco; e c) empilhamento (PIL), onde são depositadas as folhas cortadas de palma de óleo. Desse modo, os SAFs com palma de óleo eram compostos por quatro zonas de manejo específicas: CAR, ACP, PIL e DIV (Fig. 1C e D). A faixa diversificada tinha 15 m de largura. O espaçamento das plantas de *T. cacao* era de 3 × 3 m.

2.2.3 Desenho amostral

Os SAFs com palma de óleo foram comparados com um fragmento de floresta em regeneração adjacente aos SAFs. A floresta tinha aproximadamente 20 anos e havia se regenerado em uma área que passou por ciclos repetidos de corte e queima para o cultivo de mandioca. Em 2018, quatro parcelas de 30 × 30 m foram estabelecidas aleatoriamente nos SAFs; cada parcela incluía uma fila dupla de palma de óleo, um caminho de colheita, um empilhamento e uma faixa diversificada.

As amostras de solo foram coletadas das camadas de 0–10, 10–20 e 20–30 cm em trincheiras em cada zona de manejo (ou seja, área de coroamento, carreador,

empilhamento e faixa diversificada). Para avaliar os indicadores físicos da saúde do solo, dois tipos de amostras indeformadas foram coletadas: (a) cilíndricas, com um anel Kopeck de volume conhecido (para determinar a densidade do solo) e (b) na forma de um monólito de 10 × 10 cm (para determinar a estabilidade dos agregados). Para avaliar os indicadores da saúde química e biológica do solo, dois tipos de amostras deformadas foram obtidas: (a) com um trado de aço (para determinar pH, Ca, P, K, Al, carbono oxidável por permanganato de potássio, matéria orgânica do solo e carbono orgânico particulado) e (b) na forma de monólitos de 10 × 10 cm (para determinar o estoque de raízes). Uma amostra indeformada foi removida por parede de trincheira, totalizando três amostras por trincheira para testar densidade do solo, estabilidade de agregados e estoque de raízes, e oito amostras deformadas simples ao redor de cada trincheira para formar uma composta que foi usada para avaliar os outros indicadores de saúde do solo. Na floresta (FOR), as parcelas mediam 10 × 10 m e não tinham zonas de manejo específicas; portanto, as amostras foram retiradas em um ponto aleatório dentro de cada parcela.

2.2.4 Análises de solo

2.2.4.1 Indicadores da saúde química do solo

Para determinar os indicadores de saúde química do solo, as amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas através de uma malha de 2 mm. A determinação do conteúdo de carbono oxidável por permanganato de potássio (CPOX) seguiu o método de Weil et al. (2003): 2,5 g de solo seco foram pesados em duplicata em tubos Falcon de 50 mL, e 20 mL de solução de KMnO_4 0,003 M foram adicionados aos tubos. As amostras foram agitadas a 120 rpm por 2 minutos e depois permitidas a decantar por 10 minutos. Alíquotas de 0,2 mL foram retiradas da mistura solo+ KMnO_4 e diluídas para 10 mL. O teor de CPOX foi determinado lendo a alíquota em um espectrofotômetro (BioSpectro) a um comprimento de onda de 550 nm.

O pH, Ca, Mg, K, P e Al foram determinados de acordo com Teixeira et al. (2017). O pH foi medido em H_2O com uma proporção de 10 g de solo:25 mL de H_2O . Os teores de Ca, Mg e Al trocáveis foram medidos com KCl 1 M e analisados por titulação. O K trocável e o P disponível foram extraídos com Mehlich-I e quantificados com fotometria de chama e espectrofotometria, respectivamente. Esses indicadores químicos e outros

indicadores relacionados à fertilidade do solo são examinados com mais detalhes em um estudo anterior (Costa et al., 2023).

2.2.4.2 Indicadores da saúde biológica do solo

O teor de carbono orgânico do solo foi determinado via combustão a seco em um analisador elemental (Vario MACRO Cube).

Para separar o carbono orgânico particulado (COP), 10 g de solo seco (amostras peneiradas de 2 mm) foram dispersos em 30 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) e agitados a 180 rpm por 16 h em um agitador horizontal (Cambardella e Elliott, 1992). A suspensão (solo + hexametáfosfato de sódio) foi despejada em uma peneira de 0,053 mm para separar o COP. O material retido na peneira foi transferido para um recipiente de alumínio para secagem em estufa por 48 h a $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Para determinar o conteúdo de COP e COS, as amostras de solo (malha 100) foram analisadas via combustão a seco em analisador elemental (Vario MACRO Cube).

Para determinar o teor de matéria orgânica do solo (MOS), usando o método de perda por ignição (Teixeira et al., 2017), 5 g de solo seco (malha 80) foram pesados em uma crisólita de porcelana. O solo foi pré-secado a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ antes de quantificar sua massa (P0). Em seguida, as amostras foram incineradas a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ por 6 h, e a massa remanescente (P1) foi pesada. O teor de matéria orgânica foi quantificado usando a diferença entre P0 e P1.

Para determinar o estoque de raízes, os monólitos foram lavados com água corrente em uma peneira de 2,0 mm. Em seguida, as raízes com diâmetro $<2 \text{ mm}$ foram selecionadas manualmente e secas em estufa a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 h. A massa seca das raízes foi determinada usando uma balança semianalítica. O estoque de raízes (RAIZ) foi expresso em Mg ha^{-1} e calculado usando a seguinte fórmula:

$$RAIZ = \frac{MSR \times 10^4}{MA}$$

MSR: massa seca de raízes (Mg); MA é a área do monólito (m^2).

2.2.4.3 Indicadores da saúde física do solo

Determinamos a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017).

$$DS = \frac{m_s}{v}$$

DS: densidade do solo, em g cm⁻³; m_s: massa do solo seco em estufa a 105 °C, em g; e v: volume do cilindro, em cm³.

A estabilidade dos agregados foi determinada adaptando os métodos de (Kemper e Rosenau, 1986; Yoder, 1936). Os monólitos foram secos ao ar e gentilmente triturados em uma peneira de 8,0 mm. Para cada amostra de solo, foram colocadas duas réplicas de 25 g de agregados <8,0 mm em papel de filtro saturado com água e o solo foi deixado absorver a água por ação capilar por cinco minutos (Madari et al., 2005). As amostras foram agitadas verticalmente (30 rpm por 15 minutos) em um conjunto de peneiras com aberturas de 4,0, 2,0, 1,0, 0,5, 0,25, 0,106 e 0,053 mm. Os agregados retidos em cada peneira foram transferidos com um jato leve de água para um recipiente de alumínio e secos a 105 °C por 24 horas (Teixeira et al., 2017). A massa seca dos agregados foi então determinada em uma balança semianalítica

O diâmetro médio ponderado (Kemper e Rosenau, 1986) foi calculado de acordo com a equação abaixo:

$$AGREG = \sum_{i=1}^n \frac{x_i w_i}{y_i}$$

AGREG: diâmetro médio ponderado dos agregados, em mm; x_i: diâmetro médio de cada classe de agregado, em mm; w_i: massa de cada classe de agregados, em g; e y_i: massa total de agregados, em g.

2.2.4.4 Estoque de carbono orgânico do solo

Calculamos o estoque de carbono de cada camada do solo com a seguinte equação:

$$\text{Estoque de COT} = \text{teor de COT} \times DS \times th$$

Onde teor de COS é o teor de carbono orgânico do solo (%); DS é a densidade da camada de solo (g cm^3) e th é a espessura da camada de solo (cm). O estoque de carbono do solo foi corrigido para massa de solo equivalente (Ellert e Bettany, 1995; Sisti et al., 2004).

2.2.5 Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram realizadas com o software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022). Um modelo linear misto (pacote nlme), seguido de análise de contrastes ortogonais (Crawley, 2013), foram utilizados para testar os efeitos dos sistemas de cobertura do solo nos indicadores de saúde do solo. Modelos lineares mistos são mais adequados e robustos para modelos hierárquicos, como o nosso desenho de amostragem (Zuur et al., 2009). As variáveis de resposta de efeitos fixos foram COP, CPOX, MOS, teor e estoque de COS, DS, AGREG, pH, Ca, Mg, K, P, Al e RAIZ em cada camada de solo (0–10, 10–20 e 20–30 cm). As parcelas (g1) em cada sistema foram usadas como fator aleatório. Para determinar a média da parcela, foi considerada a área relativa (%) ocupada por cada zona de manejo (Tabela 2). Normalidade e homogeneidade foram testadas usando os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. As associações entre as variáveis foram avaliadas usando a correlação de Pearson (pacote *ggcorrplot*). Uma análise de componentes principais foi realizada para avaliar os indicadores de qualidade do solo usando o pacote *factoextra*; em seguida, os componentes que juntos explicaram pelo menos 60% da variância do modelo (CP1 e CP2) foram extraídos.

Tabela 2 Área relativa (%) ocupada por cada zona de manejo nos sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil.

Sistema agroflorestal	Área relativa (%)			
	PIL	DIV	ACP	CAR
SAF-A	11.22	38.35	25.74	24.69
SAF-B	12.54	46.75	21.79	18.92

SAF-A – sistema agroflorestal com baixa diversidade, SAF-V sistema agroflorestal com alta diversidade de espécies plantadas.

2.3 Resultados

2.3.1 Indicadores da saúde química e biológica do solo

O teor de C (Fig. 2A), CPOX (Fig. 2B), COP (Fig. 2C) e estoque de C (Fig. 2L) na camada de 0–10 cm (Tabela 3) foram mais altos no SAF-A (teor de C: $1,63 \pm 0,13\%$, estoque de C: $22,79 \pm 1,36 \text{ Mg ha}^{-1}$, CPOX: $568 \pm 17 \text{ mg kg}^{-1}$ e COP: $0,63 \pm 0,10 \text{ g kg}^{-1}$) e no SAF-B (teor de C: $1,84 \pm 0,04\%$, estoque de C: $25,48 \pm 0,65 \text{ Mg ha}^{-1}$, CPOX: $656 \pm 24 \text{ mg kg}^{-1}$ e COP: $0,83 \pm 0,06 \text{ g kg}^{-1}$) do que na floresta (teor de C: $1,35 \pm 0,09\%$, estoque de C: $18,06 \pm 1,25 \text{ Mg ha}^{-1}$, CPOX: $336 \pm 10 \text{ mg kg}^{-1}$ e COP: $0,44 \pm 0,03 \text{ g kg}^{-1}$). A MOS não foi afetada pelos sistemas de cobertura do solo na camada de 0–10 cm (Tabela 3, Fig. 2D). CPOX foi mais alto nos SAFs (SAF-A: $236 \pm 19,81$ e SAF-B: $333 \pm 57 \text{ mg kg}^{-1}$) do que na floresta ($142 \pm 10 \text{ mg kg}^{-1}$) na camada de solo de 10–20 cm (Tabela 3,

Efeito fixo	0-10 cm		10-20 cm		20-30 cm		gl	Efeito aleatório
	Qui-q	Pr(> Qui-q)	Qui-q	Pr(> Qui-q)	Qui-q	Pr(> Qui-q)		
COS	14.59	<0.001	3.55	0.170	2.52	0.284	2	4
CPOX	166.97	<0.001	14.67	<0.001	0.76	0.685	2	4
COP	14.82	<0.001	3.98	0.137	5.50	0.064	2	4
MOS	0.02	0.980	1.38	0.502	11.43	0.003	2	4
RAIZ	11.23	0.003	0.32	0.852	0.11	0.948	2	4
Ph	107.65	<0.001	29.08	<0.001	25.39	<0.001	2	4
Ca	81.48	<0.001	27.22	<0.001	22.53	<0.001	2	4
Mg	56.68	<0.001	12.56	0.002	9.54	0.008	2	4
K	12.64	<0.001	14.02	<0.001	3.36	0.186	2	4
P	23.22	<0.001	1.97	0.373	5.45	0.066	2	4
Al	104.83	<0.001	75.92	<0.001	64.50	<0.001	2	4
AGREG	39.29	<0.001	24.10	<0.001	60.99	<0.001	2	4
DS	3.34	0.189	1.53	0.466	7.91	0.019	2	4
Estoque de COS	21.37	<0.001	5.24	0.073	3.22	0.200	2	4

Fig. 2B); as outras variáveis não diferiram entre os tipos de cobertura do solo nesta camada. MOS foi a única variável afetada pelos tipos de cobertura do solo na camada de 20–30 cm, com valores mais altos para a floresta e o SAF-A do que para o SAF-B (Tabela 3; Fig. 2D).

Tabela 3 Análise de deviance (Teste tipo II) dos indicadores de saúde do solo em diferentes.

O pH (Fig. 2E), Ca (Fig. 2F) e Mg (Fig. 2G) foram mais altos no SAF-A e no SAF-B do que na floresta para todas as camadas de solo (Tabela 3). Ao longo do perfil do solo, o pH variou de $5,79 \pm 0,09$ a $5,26 \pm 0,15$ no SAF-A, de $5,7 \pm 0,10$ a $5,0 \pm 0,06$ no SAF-B e de $4,62 \pm 0,07$ a $4,57 \pm 0,04$ na floresta. O Ca variou de $3,78 \pm 0,32$ a $1,48 \pm$

0,20 cmol_c dm⁻³ no SAF-A, de 4,22 ± 0,20 a 1,39 ± 0,14 cmol_c dm⁻³ no SAF-B e de 1,20 ± 0,21 a 0,60 ± 0,05 cmol_c dm⁻³ na floresta. O Mg variou de 1,0 ± 0,09 a 0,36 ± 0,05 cmol_c dm⁻³ no SAF-A, de 1,08 ± 0,09 a 0,37 ± 0,03 cmol_c dm⁻³ no SAF-B e de 0,30 ± 0,05 a 0,20 ± 0,04 cmol_c dm⁻³ na floresta.

Os níveis de K foram mais altos nas camadas de solo de 0–10 e 10–20 cm (Tabela 3, Fig. 2H) para o SAF-A (0–10: 88,24 ± 11,56 e 10–20 cm: 54,28 ± 11,28 mg dm⁻³) e o SAF-B (0–10: 80,25 ± 4,07 e 10–20 cm: 63,65 ± 3,58 mg dm⁻³) em comparação com a floresta (0–10: 52,5 ± 4,11 e 10–20 cm: 27 ± 3,87 mg dm⁻³). O P foi mais alto nos sistemas agroflorestais (SAF-A: 9,16 ± 1,33 e SAF-B: 13,13 ± 2,81 mg dm⁻³) do que na floresta (1,1 ± 0,1 mg dm⁻³) para a camada de solo de 0–10 cm (Tabela 3, Fig. 2I).

Os níveis de Al foram mais altos na floresta (0,47 ± 0,06 a 0,55 ± 0,05 cmol_c dm⁻³) do que no SAF-A (0,01 ± 0,01 a 0,11 ± 0,03 cmol_c dm⁻³) e no SAF-B (0,01 ± 0,01 a 0,15 ± 0,04 cmol_c dm⁻³) em todo o perfil do solo (Tabela 3, Fig. 2J).

O estoque de raízes foi afetado pelos tipos de cobertura do solo apenas na camada de 0–10 cm (Tabela 3); o SAF-A (4,06 ± 0,53 Mg ha⁻¹) e a floresta (3,32 ± 0,22 Mg ha⁻¹) mostraram estoques de raízes mais altos do que o SAF-B (2,25 ± 0,32 Mg ha⁻¹) (Fig. 2K).

2.3.2 Indicadores da Saúde Física

Os tipos de cobertura do solo afetaram a densidade do solo na camada de 20–30 cm (Tabela 3, Fig. 3A) e afetaram a AGREG em todas as camadas de solo (Tabela 3). A floresta (0–10: 5,57 ± 0,09, 10–20: 5,39 ± 0,14 e 20–30 cm: 5,38 ± 0,24 mm) apresentou valores de AGREG mais altos do que o SAF-A (0–10: 5,41 ± 0,03, 10–20: 4,74 ± 0,10 e 20–30 cm: 3,79 ± 0,07 mm) e o SAF-B (0–10: 5,07 ± 0,01, 10–20: 4,74 ± 0,06 e 20–30 cm: 3,79 ± 0,11 mm) (Fig. 3B).

2.3.3 Correlações entre os indicadores de saúde do solo

Das 78 correlações possíveis, 31 foram fortes ($r > 0,71$), 38 foram moderadas ($0,31 > r < 0,70$) e 9 foram fracas ($r < 0,30$) (Fig. 4). Em geral, as correlações significativas foram positivas, exceto para as variáveis que se correlacionaram com DS e Al. Os conteúdos de CPOX, COP, MOS, C, Ca e Mg estavam positiva e fortemente correlacionados entre si, exceto para CPOX e MOS, que mostraram correlações moderadas entre si. Os conteúdos de COP, MOS e C mostraram uma correlação forte e

positiva com RAIZ. pH, Ca, Mg e P estavam fortemente e positivamente correlacionados entre si e negativamente correlacionados com Al, exceto para P e Al, que mostraram correlações moderadas entre si. Além disso, Ca mostrou uma correlação positiva com K. DS estava negativamente correlacionado com os indicadores de saúde química (CPOX) e biológica (MOS, conteúdo de C, RAIZ e COP) do solo. A AGGRE não foi correlacionada com nenhum outro indicador.

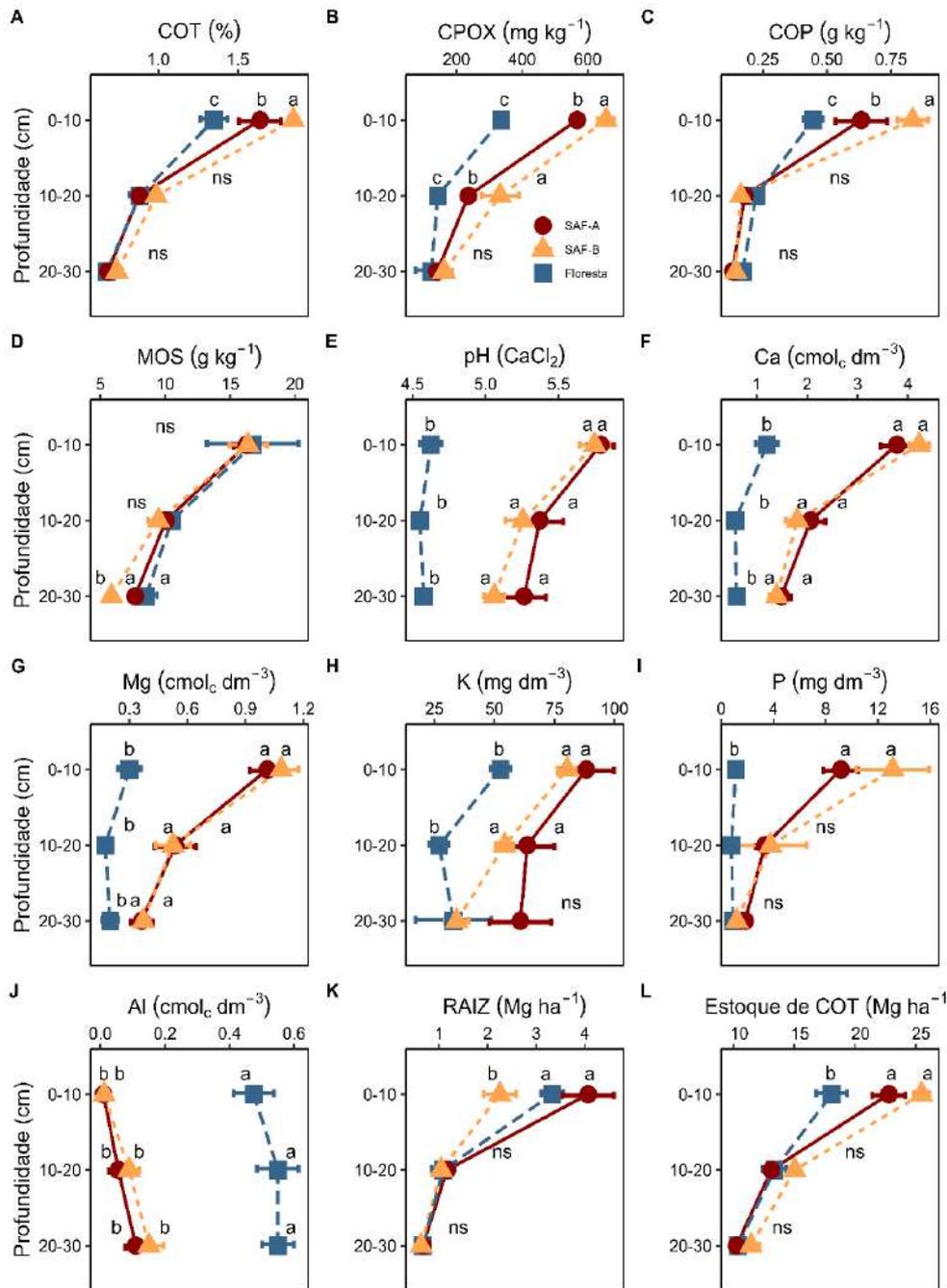


Figura 2 Indicadores de saúde química e biológica do solo: teor de carbono orgânico do solo (COS) – A, carbono do solo oxidável por permanganato (CPOX) – B, carbono orgânico particulado (COP) – C, matéria orgânica do solo (MOS) – D, pH do solo (pH CaCl₂) – E, cálcio (Ca) – F, magnésio (Mg) – G, potássio

(K) – H, fósforo (P) – I, alumínio (Al) – J, estoque de raízes (RAIZ) – K, estoque de carbono orgânico do solo (Estoque de COS) – L em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta em regeneração na Amazônia oriental, Brasil. Letras diferentes indicam diferença significativa em cada camada do solo baseado na análise de contraste.

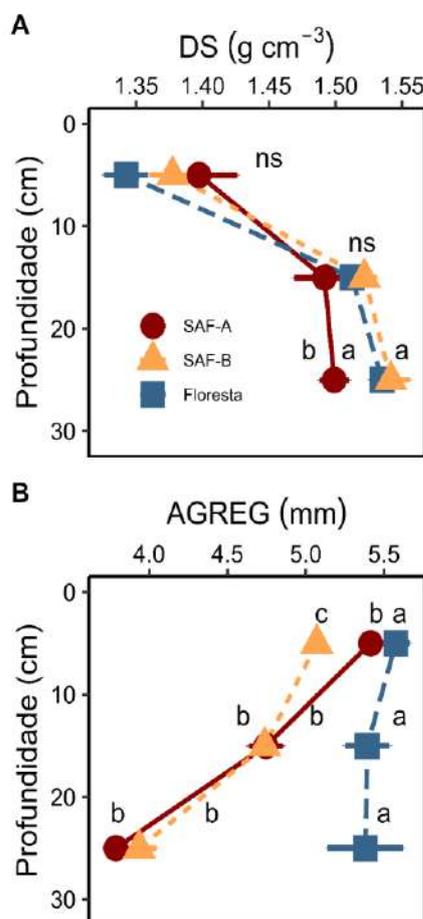


Figura 3 Indicadores de saúde física do solo: densidade do solo (DS) – A e diâmetro médio ponderado (AGREG) – B em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta em regeneração na Amazônia oriental, Brasil.

2.3.4 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais mostrou que os dois primeiros componentes (CP1 e CP2) explicaram aproximadamente 76%, 63% e 63% da variação total do modelo nas camadas de solo de 0–10, 10–20 e 20–30 cm, respectivamente (Fig. 5A, B, C). CP1 diferenciou os SAFs da FOR em todas as camadas de solo (0–10, 10–20 e 20–30 cm). Os indicadores de saúde do solo que mostraram a maior correlação com CP1 em todas as camadas de solo foram pH, P, Ca, Mg, Al e AGREG. Além disso, foram observadas correlações mais fortes para os teores de CPOX, C, K e COP na camada de 0–10 cm, para CPOX e K na camada de 10–20 cm e para COP na camada de 20–30 cm.

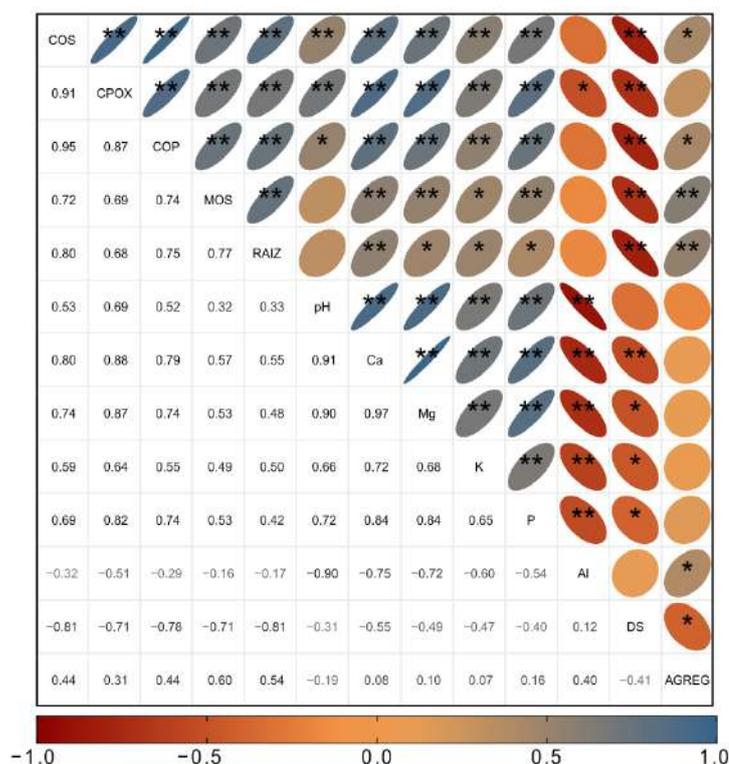


Figura 4 Correlação de Pearson entre os indicadores de saúde do solo em todas as camadas do solo (0-30 cm) em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta em regeneração na Amazônia oriental, Brasil.

2.4 Discussão

2.4.1 Saúde química e biológica do solo

Foi possível confirmar a hipótese de que os SAFs proporcionam uma melhor saúde química do solo do que as florestas secundárias, e a variação na saúde química entre ambos os sistemas de cobertura do solo varia com a profundidade. Em geral, os SAFs mostraram melhores níveis de indicadores de saúde do solo na camada mais superficial. Consistente com nossos resultados, pesquisas anteriores realizadas em nossa área experimental mostraram que os SAFs de palma de óleo apresentavam níveis mais altos de CPOX, teor de C e estoque de C quando comparados com florestas em regeneração (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021). O carbono do solo é fornecido para os SAFs por diferentes fontes de matéria orgânica, ou seja, via raízes, *litterfall*, manejo de podas e adubação orgânica (BRÉDOIRE et al., 2016; MANORAMA et al., 2021; MARDEGAN et al., 2022; NOIROT et al., 2022; SCHNEIDEWIND et al., 2019; SILVER; HALL; GONZÁLEZ, 2014). Em nosso estudo, essas fontes de matéria orgânica

tinham origens diferentes: 1) origem interna: raízes, *litterfall* e material da poda e 2) origem externa: adubação orgânica. Essas fontes de matéria orgânica formam uma cobertura sobre o solo e, conseqüentemente, o protegem contra erosão e lixiviação, além de criar um ambiente com níveis de nutrientes, temperatura, umidade e aeração favoráveis para o crescimento de raízes e fauna do solo (ERROUISSI et al., 2011; TURMEL et al., 2015; VERHULST et al., 2011). A atividade das raízes e da fauna do solo então ajudam a incorporar carbono no solo.

O carbono total do solo é composto por frações lábeis e recalcitrantes (STROSSER, 2010). Neste estudo, essas frações são representadas principalmente por CPOX e COP (lábeis) e pelo conteúdo total de carbono do solo (recalcitrante). CPOX e COP são compostos por substâncias que são mais facilmente decompostas, o que torna essas frações mais sensíveis a mudanças no manejo (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020; LUCAS; WEIL, 2021) e, portanto, bons indicadores de saúde do solo. O carbono total do solo está associado à capacidade do solo de armazenar carbono, e é composto principalmente por materiais mais recalcitrantes com uma taxa de decomposição mais baixa e tempo de residência mais longo no solo (JONES et al., 2005). Assim, sistemas de uso da terra que são capazes de elevar e manter essas frações lábeis e recalcitrantes estão respectivamente associados à capacidade de um sistema de manter a saúde do solo e estocar carbono (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995). Valores mais altos foram encontrados para ambos os compartimentos nos SAFs do que na floresta, diferente do que foi relatado em nível global (DE STEFANO; JACOBSON, 2018), no clima tropical (DULAZI et al., 2022; MAIA et al., 2007; SIQUEIRA et al., 2019) e no clima temperado (EDDY; YANG, 2022); esses estudos mostraram uma redução nos estoques de carbono e indicadores de saúde do solo nos SAFs em comparação com as florestas. Nossos resultados mostram que os SAFs de palma de óleo na Amazônia têm maior potencial do que as florestas secundárias para melhorar a saúde do solo, bem como para armazenar mais carbono no solo.

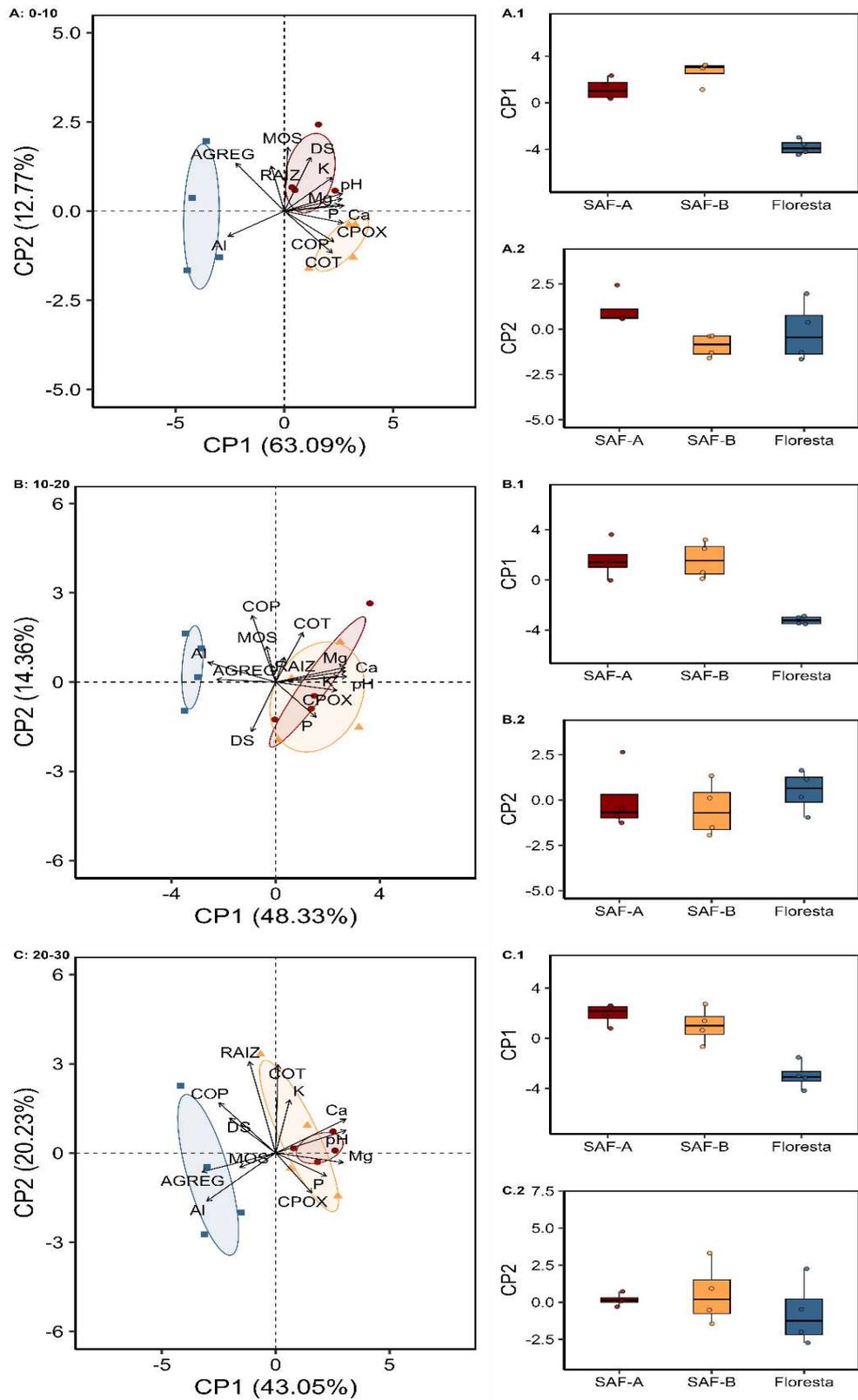


Figura 5 Dimensões do espaço multivariado dos indicadores de saúde do solo nas camadas 0-10 cm – A, B 10-20 cm – B e C 20-30 cm – C em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta em regeneração na Amazônia oriental, Brasil.

O maior teor de CPOX nas camadas mais superficiais dos SAFs do que na FOR confirma resultados anteriores na mesma área experimental e em outros SAFs de palma de óleo em Tomé-Açu (GOMES et al., 2021). Sugere-se que o maior teor de CPOX nos SAFs pode ocorrer em função do material orgânico fornecido diretamente ao solo por diferentes fontes nos SAFs, ou seja, *litterfall*, material da poda, adubação orgânica e raízes. Além disso, essas fontes de matéria orgânica contribuem indiretamente para um microecossistema favorável, em termos de umidade, temperatura e disponibilidade de nutrientes, para o crescimento de microrganismos e ciclagem de matéria orgânica e, conseqüentemente, promovem o aumento de C no solo (TAO et al., 2018; TURMEL et al., 2015).

O COP consiste em materiais orgânicos em estágios iniciais de decomposição, como resíduos de folhas, frutos, raízes e organismos vivos do solo (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020). Desse modo, mais carbono particulado é geralmente formado em sistemas com alta entrada de serapilheira e raízes (GU et al., 2016; MENDHAM et al., 2004). É possível que o maior teor de COP no SAF-B do que no SAF-A esteja principalmente relacionado à quantidade e composição da serapilheira do SAF mais diversificado. Um estudo anterior mostrou que a produção (5,35 e 2,19 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e o *turnover* (0,78 e 0,67) de serapilheira foram maiores no SAF-B do que no SAF-A (RODRIGUES, 2019). Além disso, o SAF-B é composto principalmente por *T. cacao*, cujas folhas têm uma taxa de decomposição mais lenta do que as de *G. sepium* (presente apenas no SAF-A) (BAI et al., 2022; WARTENBERG et al., 2020). O material vegetal de *T. cacao* e de árvores de sombra (*litterfall* e poda) pode desempenhar um papel importante na promoção da formação de COP no SAF-B, o que é consistente com resultados para agroflorestas de *T. cacao* no Brasil (MATOS et al., 2023) e para sistemas de alta entrada de carbono em outras regiões (GU et al., 2016; RAMESH et al., 2015; STEINFELD et al., 2023).

O estoque total de C do solo (0–10 cm) nos SAFs foi entre 4 e 6,5% maior do que na FOR, o que pode estar associado à adubação orgânica em ambos os SAFs. Dois anos após a implementação de nossa área experimental, os SAFs já tinham um estoque de carbono no solo maior do que o da FOR (CARVALHO et al., 2014). Comparado à FOR, o maior estoque de carbono no solo no SAF-A também pode estar associado ao maior estoque de raízes encontrado neste SAF. Sugere-se que a qualidade e quantidade de serapilheira no SAF-B favoreçam um aumento no estoque de carbono no solo, como indicado em estudos com SAFs em outras regiões tropicais (NIETHER et al., 2019;

PRAYOGO et al., 2021). No SAF-B, a serapilheira é formada por *T. cacao* e outras espécies localizadas na faixa diversificada. Como a faixa diversificada cobre aproximadamente 50% da área do SAF, sua contribuição para o estoque de carbono do solo em nível de sistema é alta no SAF-B. Com base nos valores de estoque de C determinados em 2010 (SAF-A: 21,8, SAF-B: 23,9 e FOR: 18,1 Mg ha⁻¹) (CARVALHO et al., 2014), estimou-se que a taxa de sequestro de C no solo foi de 0,12 no SAF-A, 0,19 no SAF-B e -0,005 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na FOR na camada de 0–10 cm. Em conjunto, nossos resultados sugerem que, sob as condições edafoclimáticas deste estudo, o SAF com palma de óleo pode ser considerado uma estratégia mais promissora para aumentar o estoque de carbono no solo do que a recuperação natural da área.

Os níveis mais elevados de pH, Ca, Mg, K e P nos SAFs com palma de óleo do que na floresta são principalmente devido ao manejo de fertilização e correção da acidez do solo realizados em nossas áreas experimentais. O calcário adicionado ao solo nos SAFs é uma fonte de Ca e Mg. Na Amazônia colombiana, níveis mais altos de Ca, Mg e pH do solo em SAFs resultaram da contribuição de calcário dolomítico e fertilizante orgânico (SUÁREZ et al., 2021). Os fertilizantes fosfato natural de Arad, polissulfato de potássio e sulfato de potássio aplicados em nossa área experimental devem ter contribuído para os valores mais altos de K e P nos SAFs. Nossos resultados sugerem que a fertilização e correção da acidez do solo nos SAFs estudados são suficientes para manter níveis mais altos de K e P nessas áreas do que na floresta. Esse resultado é importante porque esses nutrientes limitam a produtividade da palma de óleo em solos da região amazônica; o K é facilmente lixiviado pela intensa precipitação (KOTOWSKA et al., 2016) na região, que é de ~2300 mm ano⁻¹, e o P é intensamente fixado no solo por óxidos de ferro e alumínio (GAMA-RODRIGUES et al., 2014). Além disso, o nível mais baixo de Al no solo nos SAFs do que na FOR é mais provável um efeito da calagem (ALVES et al., 2021; MERLOS et al., 2023). Um estudo anterior em nosso local experimental mostrou que os níveis de pH, Ca, Mg, K e Al no solo em nosso local são adequados para o desenvolvimento das culturas (COSTA et al., 2023). Portanto, nossos resultados mostram que os SAFs têm melhor saúde química do solo em termos de fornecimento de nutrientes às plantas.

2.4.2 Saúde física do solo

A conversão de florestas em sistemas de produção agrícola geralmente causa uma diminuição na saúde física do solo (CAVALCANTI et al., 2020; DA SILVA et al., 2022; ORTIZ et al., 2017). No entanto, a densidade do solo não variou entre os SAFs e a FOR em nosso estudo, como também observado na Amazônia colombiana (CHERUBIN; CHAVARRO-BERMEO; SILVA-OLAYA, 2019); essa falta de diferença pode ser um reflexo do manejo de conservação do solo nos SAFs. Os valores de densidade do solo na camada de 0–10 cm nos SAFs e na floresta foram próximos aos encontrados em Latossolos sob SAFs de palma de óleo (1.2–1.6 g cm⁻³) (RAMOS et al., 2018) e monocultura de palma de óleo (1.2–1.5 g cm⁻³) (FRAZÃO et al., 2013a) na Amazônia brasileira, e acima desses valores para SAFs de *T. cacao* (1.05–1.13 g cm⁻³) no nordeste do Brasil (GAMA-RODRIGUES et al., 2010; MONROE et al., 2016). As práticas de conservação adotadas nos SAFs, como fertilização orgânica, manutenção da cobertura do solo e plantio direto, tendem a aumentar o teor de C no solo (CHEN et al., 2020; GOMES et al., 2021; KHANGURA et al., 2023; MANORAMA et al., 2021; RAHMAN et al., 2021). Assim, a falta de diferença nos valores de densidade do solo entre a floresta e os SAFs é um resultado positivo, pois mostra que esse indicador de saúde física do solo não é reduzido pelo cultivo.

Por outro lado, foi encontrada melhor estabilidade de agregados na FOR do que nos SAFs em todas as camadas do solo, o que é semelhante aos resultados observados na Indonésia (SAPUTRA et al., 2020) e na Costa Rica (LE BISSONNAIS et al., 2018). Agregados arredondados, porosos e macios cercados por raízes e hifas fúngicas são mais prevalentes em áreas florestais do que em sistemas de produção agrícola, o que contribui para uma qualidade estrutural do solo mais alta em áreas florestais (CAVALCANTI et al., 2020; ORTIZ et al., 2017). Como tal, o principal mecanismo que pode ter levado a uma maior estabilidade de agregados na FOR do que nos SAFs foi a ausência de distúrbios na FOR, que é o principal fator para a conservação de agregados do solo (BRIEDIS et al., 2023; CHERUBIN et al., 2017). Os procedimentos mecanizados para preparação da terra (corte e trituração) e colheita podem ter afetado negativamente a estabilidade de agregados nos SAFs. De fato, o tráfego de tratores para colheita impacta negativamente as condições físicas do solo no carreador nos nossos SAFs (OLIVEIRA et al., 2022). A estabilidade de agregados é um indicador importante da saúde física do solo porque níveis adequados de agregação refletem condições apropriadas para drenagem/retenção de água, aeração, resistência do solo à erosão e crescimento de raízes (LE BISSONNAIS et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2022; XIAO et al., 2020). Portanto,

concluimos que o solo da floresta em regeneração tem melhor saúde física do que o das áreas agroflorestais.

2.4.3 Relações entre os indicadores de saúde do solo

O carbono orgânico do solo é o principal indicador do estado de saúde do solo (LAL, 2016). Assim, espera-se que os outros indicadores de saúde do solo sigam padrões semelhantes aos mostrados pela variação no COS. Em nosso estudo, em geral, confirmamos esse comportamento: CPOX, COP, MOS, RAÍZES, Ca e Mg aumentaram quando o COS aumentou. A relação entre os indicadores de C e COS sugere que os fatores (manutenção da cobertura do solo, adubação orgânica e poda) que influenciam o armazenamento de COS também controlam os estoques/níveis desses indicadores. Nossos resultados implicam que CPOX e COP são os indicadores mais apropriados em termos de custo e sensibilidade para identificar mudanças no carbono orgânico do solo em função de diferentes sistemas de cobertura do solo, conforme relatado em estudos que avaliaram o uso de CPOX (BENBI et al., 2015; BRUUN et al., 2013; LUAN et al., 2010; NOIROT et al., 2022; PANETTIERI et al., 2013; RAMESH et al., 2015; ROMERO et al., 2018) e o COP (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; RAMESH et al., 2015; USDA, 2015a) como indicadores de saúde do solo.

Da mesma forma que o COS, os indicadores CPOX, COP, MOS, RAIZ, Ca e Mg variaram inversamente ao DS e Al. O aumento da densidade do solo geralmente ocorre simultaneamente à diminuição dos teores e estoques de C no solo (CAVALCANTI et al., 2020; CHERUBIN; CHAVARRO-BERMEO; SILVA-OLAYA, 2019; OLIVEIRA et al., 2022), o que foi confirmado em nossos resultados de correlação, nos quais a densidade do solo foi inversamente proporcional aos indicadores de C do solo (CPOX, COP, COS e MOS). O aumento da densidade do solo aumenta a resistência do solo à penetração de raízes (CHERUBIN; CHAVARRO-BERMEO; SILVA-OLAYA, 2019), o que pode reduzir o desenvolvimento das raízes. Por fim, a relação inversa entre o teor de Al e os teores de Ca e Mg resulta do efeito da calagem, que adiciona Ca e Mg ao solo e simultaneamente causa a substituição de íons de Al dos sítios de troca.

2.4.4 SAFs com palma de óleo para construção da saúde do solo

Considerando todas as variáveis de saúde do solo avaliadas, a análise de componentes principais mostrou que, em todas as camadas do solo, as SAFs se

comportaram de forma diferente da floresta. Em geral, as variáveis que mais distinguiram as SAFs da floresta foram CPOX, COP, pH, Ca e Mg. É possível que essa distinção seja resultado do efeito de dois grupos de indicadores: 1) indicadores de carbono do solo (CPOX e COP) que refletem o regime de manejo (adubação orgânica e inorgânica, poda e manutenção da serapilheira no solo) associado à composição/arranjo das SAFs, e 2) o segundo conjunto de indicadores inclui aqueles que representam a saúde química do solo (pH, Ca e Mg) e refletem principalmente a calagem realizada nas áreas das SAFs. Esses indicadores, em níveis adequados, permitem um ambiente favorável para o pleno desenvolvimento das plantas e a atividade de organismos do solo (FERRARI NETO et al., 2021; SHU et al., 2023).

Em geral, a saúde do solo melhora em sistemas de produção agrícola que são gerenciados com práticas de conservação (KHANGURA et al., 2023), como aqueles que apoiam a diversificação de culturas (BEILLOUIN et al., 2021), manutenção da cobertura do solo (MANORAMA et al., 2021), sem perturbação do solo (Sá et al., 2015), adubação orgânica (LORI et al., 2022; OECHAIYAPHUM et al., 2020; RAHMAN et al., 2021; TAO et al., 2018) e plantio de espécies perenes (CREWS; RUMSEY, 2017; PAUDEL et al., 2012). Em sistemas com espécies perenes, o carbono tende a ser incorporado em camadas mais profundas do solo (HOMBEGOWDA et al., 2016; SHI et al., 2018; SIEGWART et al., 2023). De fato, tais práticas de conservação estavam presentes em nossas SAFs e, portanto, podem ter sido responsáveis pela melhor saúde química do solo e maior sequestro de carbono no solo nessas áreas do que na floresta. Em relação à saúde física do solo, as SAFs não afetaram negativamente a densidade do solo, mas reduziram a estabilidade dos agregados do solo.

2.4.5 Perspectivas para sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia

Nossa pesquisa observacional é valiosa porque mostra sistemas agroflorestais de palma de óleo reais adotados por produtores em uma região que é um *hotspot* de produção agroflorestal (Tomé-Açu) na Amazônia brasileira. No entanto, reconhecemos que os estudos observacionais têm limitações no que diz respeito a fornecer uma compreensão mais profunda dos processos do solo, como aqueles que levaram à observação de diferenças nos indicadores de saúde do solo entre as SAFs e a floresta. Estudos futuros devem considerar um experimento manipulativo com uma abordagem fatorial completa que combine diferentes sistemas (agroflorestais e monoculturas) e abordagens de

fertilização (orgânica e convencional), bem como diferentes tipos de agricultores (pequenos versus grandes agricultores). Para obter um panorama mais completo da saúde do solo em sistemas agroflorestais de palma de óleo na Amazônia, sugerimos ainda que indicadores biológicos relacionados ao tamanho, atividade e diversidade da comunidade de organismos do solo sejam estudados, pois podem explicar o funcionamento da comunidade microbiana do solo com mais clareza e, conseqüentemente, o desempenho das funções do solo. Também recomendamos que a evolução da saúde do solo das SAFs seja monitorada ao longo do tempo, pois a palma de óleo possui um ciclo comercial longo e a expansão dessa cultura tem sido incentivada na Amazônia brasileira, especialmente em monoculturas, com o objetivo de recuperar as funções ecológicas de áreas degradadas.

Além do nosso estudo, outros estudos investigaram diversos indicadores ambientais (CARVALHO et al., 2014; COSTA et al., 2023; GOMES et al., 2021; MAIA et al., 2021; RAMOS et al., 2018) em áreas experimentais piloto de diversificação da palma de óleo (total de 18 ha), estritamente sob manejo de agricultura orgânica. Essas pesquisas servem como base científica para apoiar a expansão contínua dos sistemas agroflorestais de palma de óleo na Amazônia brasileira. Desde 2017, SAFs com palma de óleo vem sendo expandida para 190 ha. De acordo com técnicos agrícolas envolvidos na expansão dos SAFs com palma de óleo (MICCOLIS et al., 2021), foram necessários ajustes em relação ao manejo de nutrientes (ou seja, combinação de fertilizantes orgânicos e químicos sintéticos) e uma redução na diversidade de espécies plantadas para tornar o sistema economicamente viável. Os principais desafios envolvidos na expansão do SAF com palma de óleo são a regularização fundiária e ambiental e o financiamento.

2.5 Conclusões

Com base nos indicadores de saúde do solo avaliados, em geral, os sistemas agroflorestais de palma de óleo são capazes de melhorar a saúde química e biológica do solo na camada mais superficial do solo; em camadas mais profundas do solo, eles não têm um impacto negativo nos indicadores de carbono da saúde do solo e melhoram a fertilidade do solo ao nível encontrado em outros solos sob condições de regeneração natural na Amazônia Oriental. O estabelecimento de sistemas agroflorestais de palma com palma óleo não compacta o solo, mas reduz a estabilidade dos agregados. Portanto, concluímos que os sistemas agroflorestais de palma de óleo podem ser uma alternativa de sistema de produção agrícola com o potencial de melhorar a saúde do solo na Amazônia.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. S.; VIEIRA, I. C. G.; FERRAZ, S. F. B. Long-term assessment of oil palm expansion and landscape change in the eastern Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 90, p. 104321, 2020.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, L. A. et al. Soil chemical properties and crop response to gypsum and limestone on a coarse-textured Ultisol under no-till in the Brazilian Pampa biome. **Geoderma Regional**, v. 25, 2021.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. **Biogeosciences**, v. 6, n. 12, p. 2759–2778, 2009.
- ASMAH, S. et al. Effects of polyculture and monoculture farming in oil palm smallholdings on tropical fruit-feeding butterfly diversity. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 19, n. 1, p. 70–80, 2017.
- BARONA, E. et al. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 2, 2010.
- BEILLOUIN, D. et al. **Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services**. [s.l: s.n.]. v. 27
- BENBI, D. K. et al. Sensitivity of labile soil organic carbon pools to long-term fertilizer, straw and manure management in rice-wheat system. **Pedosphere**, v. 25, n. 4, p. 534–545, 2015.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, 1995.
- BRASIL. **Law Number 6938**, 1981.
- BRÉDOIRE, F. et al. Distributions of fine root length and mass with soil depth in natural ecosystems of southwestern Siberia. **Plant and Soil**, v. 400, n. 1–2, p. 315–335, 2016.
- BRIEDIS, C. et al. Preservation of labile organic compounds is the pathway for carbon storage in a 23-year continuous no-till system on a Ferralsol in southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 33, n. April, 2023.
- BRUUN, T. B. et al. Improved sampling methods document decline in soil organic carbon stocks and concentrations of permanganate oxidizable carbon after transition from swidden to oil palm cultivation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 178, p. 127–134, 2013.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

- CARVALHO, W. R. et al. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 2, p. 357–368, 2014.
- CAVALCANTI, R. Q. et al. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, n. February, p. 114353, 2020.
- CHEN, Y. et al. Rotation and organic fertilizers stabilize soil water-stable aggregates and their associated carbon and nitrogen in flue-cured tobacco production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 1, p. 192–205, 2020.
- CHERUBIN, M. R. et al. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, v. 173, n. 2017, p. 64–74, 2017.
- CHERUBIN, M. R.; CHAVARRO-BERMEO, J. P.; SILVA-OLAYA, A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 5, p. 1741–1753, 2019.
- COSTA, L. R. DE J. et al. Soil fertility in oil palm agroforestry systems in the Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, n. 0123456789, 2023.
- CRAWLEY, M. J. **The R Book**. 2. ed. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2013.
- CREWS, T. E.; RUMSEY, B. E. What agriculture can learn from native ecosystems in building soil organic matter: A review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 4, p. 1–18, 2017.
- DA SILVA, R. B. et al. A soil quality physical–chemical approach 30 years after land-use change from forest to banana plantation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 7, 2022.
- DE STEFANO, A.; JACOBSON, M. G. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 285–299, 2018.
- DOLLINGER, J.; JOSE, S. Agroforestry for soil health. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 213–219, 2018.
- DULAZI, A. A. et al. Soil organic carbon and its labile pools as modulated by soil microbes under different land use practices in Typic Ustochrepts. **Tropical Ecology**, v. 64, n. 2, p. 276–286, 2022.
- EDDY, W. C.; YANG, W. H. Improvements in soil health and soil carbon sequestration by an agroforestry for food production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 333, n. September 2021, p. 107945, 2022.
- ERROUSSI, F. et al. Soil invertebrates in durum wheat (*Triticum durum* L.) cropping system under Mediterranean semi arid conditions: A comparison between conventional and no-tillage management. **Soil and Tillage Research**, v. 112, n. 2, p. 122–132, 2011.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. In: **Advances in Agronomy**. [s.l.: s.n.]. v. 99p. 346–389.
- FAO. **Soil degradation**. Disponível em: <<https://www.fao.org/soils-portal/soil->

degradation-restoration/en/>.

- FERRARI NETO, J. et al. Soil carbon and nitrogen fractions and physical attributes affected by soil acidity amendments under no-till on Oxisol in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 24, 2021.
- FINE, A. K.; SCHINDELBECK, R. R. Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database. **Soil & Water Management & Conservation Statistics**, v. 81, p. 589–601, 2017.
- FOLEY, J. A. et al. Amazonia revealed: Forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 1, p. 25–32, 2007.
- GAMA-RODRIGUES, A. C. et al. An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1–3, p. 453–469, 2014.
- GÉRARD, A. et al. Oil-palm yields in diversified plantations: Initial results from a biodiversity enrichment experiment in Sumatra, Indonesia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 253–260, 2017.
- GMACH, M. R. et al. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, 2018.
- GOMES, M. F. et al. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation and Development**, v. 32, n. 15, p. 4313–4326, 2021.
- GU, C. et al. Dynamic changes of soil surface organic carbon under different mulching practices in citrus orchards on sloping land. **PLoS ONE**, v. 11, n. 12, p. 1–16, 2016.
- GUIMARÃES, R. M. L. et al. The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 75–82, 2017.
- HANEY, R. L. et al. The soil health tool—Theory and initial broad-scale application. **Applied Soil Ecology**, v. 125, n. February, p. 162–168, 2018.
- HOMBEGOWDA, H. C. et al. On the rebound: Soil organic carbon stocks can bounce back to near forest levels when agroforests replace agriculture in southern India. **Soil**, v. 2, n. 1, p. 13–23, 2016.
- INPE. **Mapeamento da degradação florestal na Amazônia brasileira**. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/degrad>>.
- JACKSON, W. Natural systems agriculture: A truly radical alternative. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, n. 2, p. 111–117, 2002.
- JAKOVAC, C. C. et al. Loss of secondary-forest resilience by land-use intensification in the Amazon. **Journal of Ecology**, v. 103, n. 1, p. 67–77, 2015.
- JONES, C. et al. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. **Global Change Biology**, v. 11, n. 1, p. 154–166, 2005.
- JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview.

- Agroforestry Systems**, v. 76, n. 1, p. 1–10, 2009.
- KARLEN, D. L. et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4, 1997.
- KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: **Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods**. WI: [s.n.]. p. 425–442.
- KHANGURA, R. et al. Regenerative Agriculture—A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 3, p. 1–41, 2023.
- KHASANAH, N. et al. Oil Palm Agroforestry Can Achieve Economic and Environmental Gains as Indicated by Multifunctional Land Equivalent Ratios. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, n. January, p. 1–13, 2020.
- KOTOWSKA, M. M. et al. Conversion of tropical lowland forest reduces nutrient return through litterfall, and alters nutrient use efficiency and seasonality of net primary production. **Oecologia**, v. 180, n. 2, p. 601–618, 2016.
- LAL, R. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, v. 5, n. 4, p. 212–222, 2016.
- LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020.
- LE BISSONNAIS, Y. et al. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agroecosystems: effect of plant roots and soil characteristics. **Plant and Soil**, v. 424, n. 1–2, p. 303–317, 2018.
- LORI, M. et al. Organic management enhances soil quality and drives microbial community diversity in cocoa production systems. **Science of the Total Environment**, v. 834, n. March, 2022.
- LUAN, J. et al. Assessments of the impacts of Chinese fir plantation and natural regenerated forest on soil organic matter quality at Longmen mountain, Sichuan, China. **Geoderma**, v. 156, n. 3–4, p. 228–236, 2010.
- LUCAS, S.; WEIL, R. Can permanganate oxidizable carbon predict soil function responses to soil organic matter management? **Soil Science Society of America Journal**, n. January, p. 1768–1784, 2021.
- MADARI, B. et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 80, n. 1–2, p. 185–200, 2005.
- MAIA, S. M. F. et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007.
- MAIA, S. R. et al. Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. May, p. 731–740, 2021.
- MALIK, A. A. et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling

- processes. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2018.
- MANORAMA, K. et al. Mulching and technological interventions avoid land degradation in an intensive oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) production system. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 13, p. 3785–3797, 15 ago. 2021.
- MARDEGAN, S. F. et al. Organic farming enhances soil carbon and nitrogen dynamics in oil palm crops from Southeast Amazon. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 68, n. 1, p. 104–113, 2022.
- MATRICARDI, E. A. T. et al. Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 369, n. 6509, p. 1378–1382, 2020.
- MENDES, L. W. et al. Land-use system shapes soil bacterial communities in Southeastern Amazon region. **Applied Soil Ecology**, v. 95, p. 151–160, 2015.
- MENDHAM, D. S. et al. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 7, p. 1067–1074, 2004.
- MERLOS, F. A. et al. Estimating lime requirements for tropical soils: Model comparison and development. **Geoderma**, v. 432, n. March, p. 0–2, 2023.
- MESQUITA, R. D. C. G. et al. Amazon rainforest succession: stochasticity or land-use legacy? **BioScience**, v. 65, n. 9, p. 849–861, 2015.
- MOEBIUS-CLUNE, B. N. et al. **Comprehensive assessment of soil health - The Cornell framework manual**. [s.l: s.n.].
- MUCHANE, M. N. et al. Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 295, n. February, p. 106899, 2020.
- NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 1, p. 10–23, 2009.
- NOIROT, L. M. et al. Impacts of empty fruit bunch applications on soil organic carbon in an industrial oil palm plantation. **Journal of Environmental Management**, v. 317, n. October 2021, 2022.
- OECHAIYAPHUM, K. et al. Impact of long-term agricultural management practices on soil organic carbon and soil fertility of paddy fields in Northeastern Thailand. **Geoderma Regional**, v. 22, 2020.
- OLIVEIRA, R. L. L. et al. Management practices affect soil carbon and physical quality in oil palm agroforestry systems in the Amazon. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, n. 0123456789, 2022.
- ORTIZ, P. F. S. et al. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 11, n. September, p. 62–70, 2017.
- PANETTIERI, M. et al. Moldboard plowing effects on soil aggregation and soil organic matter quality assessed by ¹³C CPMAS NMR and biochemical analyses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 177, p. 48–57, 2013.
- PAUDEL, B. R. et al. Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and

- agroforestry buffer management. **Agroforestry Systems**, v. 84, n. 2, p. 311–323, 2012.
- PEDRINHO, A. et al. Forest-to-pasture conversion and recovery based on assessment of microbial communities in Eastern Amazon rainforest. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 95, n. 3, p. 1–10, 2019.
- PRAYOGO, C. et al. **Does different management and organic inputs in agroforestry system impact the changes on soil respiration and microbial biomass carbon?** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...2021**
- PUTZ, F. E.; REDFORD, K. H. The importance of defining “Forest”: Tropical forest degradation, deforestation, long-term phase shifts, and further transitions. **Biotropica**, v. 42, n. 1, p. 10–20, 2010.
- QUESADA, C. A. et al. Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. **Biogeosciences Discussions**, v. 6, n. 2, p. 3993–4057, 2009.
- QUESADA, C. A. et al. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, n. 6, p. 1415–1440, 2011.
- RAHMAN, N. et al. The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. **Journal of Environmental Management**, v. 278, n. P2, p. 111446, 2021.
- RAJAB, Y. A. et al. Cacao cultivation under diverse shade tree cover allows high carbon storage and sequestration without yield losses. **PLoS ONE**, v. 11, n. 2, p. 1–22, 2016.
- RAMALHO FILHO, A. et al. **Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia.** [s.l: s.n.]. v. 1
- RAMESH, T. et al. Assessment of soil organic carbon stocks and fractions under different agroforestry systems in subtropical hill agroecosystems of north-east India. **Agroforestry Systems**, v. 89, n. 4, p. 677–690, 2015.
- RODRIGUES, S. J. S. DE C. **Dinâmica de carbono em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental.** [s.l.] Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.
- RODRIGUES, T. E. et al. **Caracterização e Classificação dos Solos do Município de Tomé-Açu, PA.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001.
- ROMERO, C. M. et al. Patterns of change in permanganate oxidizable soil organic matter from semiarid drylands reflected by absorbance spectroscopy and Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. **Organic Geochemistry**, v. 120, p. 19–30, 2018.
- SÁ, J. C. DE M. et al. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation and Development**, v. 26, n. 6, p. 531–543, 2015.
- SAHU, C.; MISHRA, R.; BASTI, S. Land-use change affects carbon storage and lability in tropical soil of India. **Geoderma Regional**, v. 32, n. August 2022, 2023.
- SANCHEZ, P. A. **Properties and management of soils in the Tropics.** 2. ed. [s.l.]

Cambridge University Press, 2019.

- SAPUTRA, D. D. et al. Can cocoa agroforestry restore degraded soil structure following conversion from forest to agricultural use? **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 6, p. 2261–2276, 2020.
- SATO, M. K. et al. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **International Agrophysics**, v. 29, n. 4, p. 441–447, 2015.
- SCHMIDT, M. W. I. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 49–56, 2011.
- SCHNEIDEWIND, U. et al. Carbon stocks, litterfall and pruning residues in monoculture and agroforestry cacao production systems. **Experimental Agriculture**, v. 55, n. 3, p. 452–470, 2019.
- SHI, L. et al. Agroforestry systems : Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. **Land Degradation & Development**, v. 29, p. 3886–3897, 2018.
- SHU, X. et al. Soil pH moderates the resistance and resilience of C and N cycling to transient and persistent stress. **Applied Soil Ecology**, v. 182, n. October 2022, p. 104690, 2023.
- SHUHADA, S. N. et al. Conversion of peat swamp forest to oil palm cultivation reduces the diversity and abundance of macrofungi. **Global Ecology and Conservation**, v. 23, p. e01122, 2020.
- SIEGWART, L. et al. Contribution of tree and crop roots to soil carbon stocks in a Sub-Saharan agroforestry parkland in Senegal. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 352, n. December 2022, 2023.
- SILVER, W. L.; HALL, S. J.; GONZÁLEZ, G. Differential effects of canopy trimming and litter deposition on litterfall and nutrient dynamics in a wet subtropical forest. **Forest Ecology and Management**, v. 332, p. 47–55, 2014.
- SIQUEIRA, C. C. Z. et al. Carbon stocks of a degraded soil recovered with agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 9, 2019.
- SOMARRIBA, E. Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. **Agroforestry Systems**, v. 19, n. 3, p. 233–240, 1992.
- STROSSER, E. Methods for determination of labile soil organic matter: An overview. **Journal of Agrobiology**, v. 27, n. 2, p. 49–60, 2010.
- SUÁREZ, L. R. et al. Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 314, n. January, 2021.
- TAO, H. H. et al. Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 256, n. December 2017, p. 105–113, 2018.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

- TEUSCHER, M. et al. Experimental biodiversity enrichment in oil-palm-dominated landscapes in Indonesia. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. OCTOBER2016, p. 1–15, 2016.
- TURMEL, M. S. et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis. **Agricultural Systems**, v. 134, p. 6–16, 2015.
- USDA. **Soil quality indicators**. Natural Resources Conservation Service, 2015.
- USDA. **Recommended Soil Health Indicators and Associated Laboratory Procedures** Soil Health Technical Note No. 450-03. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. [s.l: s.n.].
- VERHULST, N. et al. Wheat yield and tillage-straw management system×year interaction explained by climatic co-variables for an irrigated bed planting system in northwestern Mexico. **Field Crops Research**, v. 124, n. 3, p. 347–356, 2011.
- WARTENBERG, A. C. et al. Soil fertility and Theobroma cacao growth and productivity under commonly intercropped shade-tree species in Sulawesi, Indonesia. **Plant and Soil**, v. 453, n. 1–2, p. 87–104, 2020.
- XIAO, L. et al. Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau. **Ecological Engineering**, v. 143, n. 5, p. 105671, 2020.
- YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 28, n. 05, p. 337–351, 1936.
- ZUUR, A. F. et al. **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York, NY: Springer New York, 2009.

3 ENZIMAS E CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Durante a preparação deste trabalho, a autora utilizou o ChatGPT para gerar um rascunho das seções de resumo em 06.06.2024. Após o uso desta ferramenta/serviço, a autora revisou e editou o conteúdo conforme necessário e assume total responsabilidade pelo conteúdo da publicação.

RESUMO

O cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais é uma alternativa para recuperar áreas degradadas e melhorar a saúde do solo na Amazônia. O objetivo deste foi investigar os impactos de monocultivo e sistemas agroflorestais (SAFs) de palma de óleo na saúde do solo comparados à floresta em regeneração, com base nos indicadores como carbono orgânico total (COT), beta-glucosidase (Beta), arylsulfatase (Aryl), carbono oxidável por permanganato de potássio (CPOX), respiração microbiana (RM) e matéria orgânica do solo (MOS). Este estudo também analisou a variação espacial desses indicadores em diferentes zonas de manejo dos sistemas de cultivo de palma de óleo: empilhamento (PIL), área de coroamento da palma de óleo (ACP), carreador (CAR) e faixa diversificada (DIV). O estudo foi conduzido em Tomé-Açu, Pará, Brasil. Os resultados indicaram que os valores de COT, Beta, Aryl, CPOX e MOS foram aproximadamente 19, 36, 12, 18 e 26% maiores nos SAFs em comparação à floresta, respectivamente, enquanto a RM foi 4% menor. Em relação à floresta, o monocultivo apresentou reduções de 27, 42, 55, 34 e 0,5% em COT, Beta, Aryl, CPOX e MOS, com a RM sendo 13% maior que na floresta. Dentro dos SAFs, HAR, ACP e DIV apresentaram reduções comparadas ao PIL para todas as variáveis: COT, Beta, Aryl, CPOX, RM e MOS. No monocultivo, CAR e ACP apresentaram reduções significativas em COT, Aryl e CPOX comparados a PIL, nessa mesma comparação a Beta sofreu redução de 30% em CAR; no entanto, RM e MOS mostraram incrementos em CAR e ACP comparados a PIL. Esses resultados sugerem que os SAFs são mais eficazes na melhoria da saúde do solo em comparação ao monocultivo e até mesmo à floresta secundária. Os indicadores COT, Beta, Aryl e CPOX se mostraram mais sensíveis na diferenciação dos sistemas de cobertura do solo e das zonas de manejo do que RM e MOS. Os dados indicam que as zonas de manejo com maior aporte de carbono, como PIL, DIV e ACP, promovem uma melhor saúde do solo. Portanto, os SAFs com palma de óleo são uma alternativa viável ao monocultivo para a melhoria da saúde do solo na região amazônica.

Palavras-chave: qualidade do solo; sistema agroflorestal; saúde do solo; indicadores biológicos

3.1 Introdução

Na região amazônica brasileira, a vegetação natural (floresta ombrófila densa) foi intensamente convertida em pastagens, resultando geralmente em áreas degradadas (BARONA et al., 2010). O cultivo de palma de óleo, que é predominantemente conduzido em monocultivo, é incentivado na região como uma opção para recuperar o potencial produtivo e aumentar o estoque de carbono no solo dessas áreas degradadas (BENAMI et al., 2018; MONTEIRO DE CARVALHO, 2013; RAMALHO FILHO et al., 2010). No entanto, o monocultivo de palma de óleo não reflete a diversidade presente na vegetação natural da Amazônia (ALMEIDA et al., 2020), o que gera dúvidas sobre o potencial do monocultivo para restauração de áreas degradadas. Por outro lado, sistemas agroflorestais apresentam maior similaridade com florestas nativas da região em termos de diversidade e benefícios ecológicos (armazenamento de carbono no solo e na biomassa vegetal, melhoria da qualidade do solo e do ar, entre outros). Por isso, SAFs com palma de óleo têm sido propostos como alternativa ao monocultivo de palma de óleo para promover benefícios ecológicos (KHASANAH et al., 2020; KOH; LEVANG; GHAZOUL, 2009; MICCOLIS; VAN NOORDWIJK; AMARAL, 2021) e recuperar áreas degradadas.

Plantios de palma de óleo, sejam monocultivos ou sistemas mais diversificados (e.g., SAFs), apresentam locais característicos que diferem em manejo (zonas de manejo). Existe um aporte de matéria orgânica tipicamente diferente em cada zona de manejo (GOODRICK et al., 2015; RAHMAN et al., 2021), o que gera uma clara variação espacial na saúde do solo em plantios de palma de óleo (GOMES et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022; RÜEGG et al., 2019). Em geral, o carbono orgânico total do solo (COT) é indicador mais utilizado para avaliar a saúde do solo nas zonas de manejo de sistemas de cultivo de palma de óleo (FRAZÃO et al., 2013b, 2014; GOMES et al., 2021; GOODRICK et al., 2016; GUILLAUME et al., 2016; NOIROT et al., 2022; RAHMAN et al., 2018, 2021). No entanto, a saúde do solo também pode ser determinada por diversos indicadores, dentre eles: os biológicos (e.g. carbono da biomassa microbiana, respiração microbiana, atividade das enzimas do solo, diversidade microbiana e carbono oxidável por permanganato de potássio); os químicos (e.g. pH, Ca, Mg, K, P, Al e CTC); e os físicos (e.g. densidade do solo, porosidade, resistência do solo à penetração de raízes e estabilidade agregados) (DIGNAC, MARIE-FRANCE DERRIEN et al., 2017; HAYNES, 2005; MOEBIUS-CLUNE et al., 2016). Portanto, avaliar outros indicadores além do COT pode auxiliar no entendimento de processos do solo mais específicos influenciados por práticas de manejo em sistemas de cultivo de palma de óleo.

O carbono orgânico total é considerado o principal indicador de saúde do solo (LAL, 2016), pois é fortemente correlacionado com diversas propriedades do solo. Contudo, o COT é composto majoritariamente por compostos recalcitrantes, que não são afetados rapidamente por mudanças em fatores-chave que afetam a saúde do solo, tais como manejo, clima e tipo de sistema de cobertura do solo (STROSSER, 2010). Indicadores sensíveis em geral são aqueles que (a) são compostos principalmente por substâncias lábeis, (b) sofrem alteração rapidamente em resposta a interferências externas ao solo e (c) refletem a atividade da comunidade microbiana do solo (KARACA et al., 2010; NIELSEN; WINDING, 2002; STROSSER, 2010).

As enzimas desempenham um papel importante na mineralização da matéria orgânica do solo e refletem processos específicos da comunidade microbiana e condições físico-químicas do solo (TABATABAI, 1994); além disso, as enzimas arylsulfatase e beta-glucosidase têm sido estudadas pela Embrapa para a criação de um índice de saúde do solo (MENDES, 2020; MENDES et al., 2020). A respiração microbiana (RM), representada pela quantidade de CO₂ emitido pelos microrganismos do solo, reflete a taxa de mineralização do material orgânico em um determinado período (JENKINSON, 1976; NIELSEN; WINDING, 2002). A matéria orgânica (MOS) representa um conjunto de compostos orgânicos em diversos estágios de decomposição (PRIBYL, 2010). A respiração microbiana e a matéria orgânica do solo são indicadores de saúde do solo consolidados na literatura (MOEBIUS-CLUNE et al., 2016). Outro indicador sensível de saúde do solo é o CPOX, que embora não seja composto somente por substâncias lábeis, é fortemente apontado como um ótimo indicador do status da saúde do solo (CALDERÓN et al., 2017; CHRISTY et al., 2023; CULMAN et al., 2012); o CPOX é fortemente estudado na comunidade internacional como um indicador de saúde do solo (FINE; SCHINDELBECK, 2017; MOEBIUS-CLUNE et al., 2016).

Apesar da Amazônia representar aproximadamente 60% do território brasileiro e abrigar mais de 98% da produção total de palma de óleo do Brasil (IBGE, 2022), estudos que avaliam indicadores de saúde do solo são escassos para monocultivos e para sistemas agroflorestais com palma de óleo na região. Portanto, há uma lacuna sobre o entendimento de como esses indicadores variam entre os sistemas de cobertura do solo e entre as zonas de manejo em sistemas de cultivo de palma de óleo. Desse modo, nosso objetivo principal foi avaliar como os indicadores Beta, Aryl, CPOX, RM e MOS perdida por ignição variam entre os sistemas de cobertura do solo (SAF com palma de óleo, monocultivo de palma de óleo e floresta secundária). Nosso objetivo secundário foi avaliar a variação

espacial desses indicadores entre as zonas de manejo dos sistemas de produção de palma de óleo. Nossas hipóteses são que os níveis dos indicadores serão: 1) maiores no SAF, intermediários na floresta e inferiores no monocultivo e 2) maiores no empilhamento, intermediário no coroamento e faixa diversificada e inferior no carreador.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em cinco fazendas no município de Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental (Figura 6). As fazendas 1 (02°24'17" S, 48°14'37" W), 2 (02°20'54" S, 48°15'44" W) e 3 (02°40'42" S, 48°20'45" W), eram compostas por dois sistemas agroflorestais com palma de óleo e um fragmento de floresta secundária. As fazendas 4 (02°20'18" S, 48°15'55" W) e 5 (02°31'40" S, 48°24'57" W) eram constituídas por monocultivos de palma de óleo. O clima da região é classificado como Ami segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013); o mês mais chuvoso é março e o menos chuvoso é setembro; a precipitação anual média é 2300 mm e a temperatura média anual é 26.8°C (PACHÊCO; BASTOS; CREÃO, 2009). A vegetação original era floresta ombrófila densa; atualmente a região é coberta por um mosaico de vegetações (ALMEIDA; VIEIRA; FERRAZ, 2020a; MATRICARDI et al., 2020). Latossolo Amarelo predomina na região (RODRIGUES et al., 2001).

Em março de 2008, dois tipos de SAFs foram implantados nas fazendas 1, 2 e 3, em áreas previamente cobertas por um pomar abandonado com aproximadamente 10 anos de idade na fazenda 1; floresta em regeneração com aproximadamente 20 anos de idade na fazenda 2; e pastagem degradada com aproximadamente 25 anos de idade na fazenda 3. Não houve conversão de floresta madura para instalação dos SAFs. As áreas foram preparadas sem uso de fogo, ou seja, utilizaram-se corte e trituração nas fazendas 1 e 2 e gradagem na fazenda 3. Mais detalhes sobre o preparo das áreas podem ser encontrados em Carvalho et al. (2014).

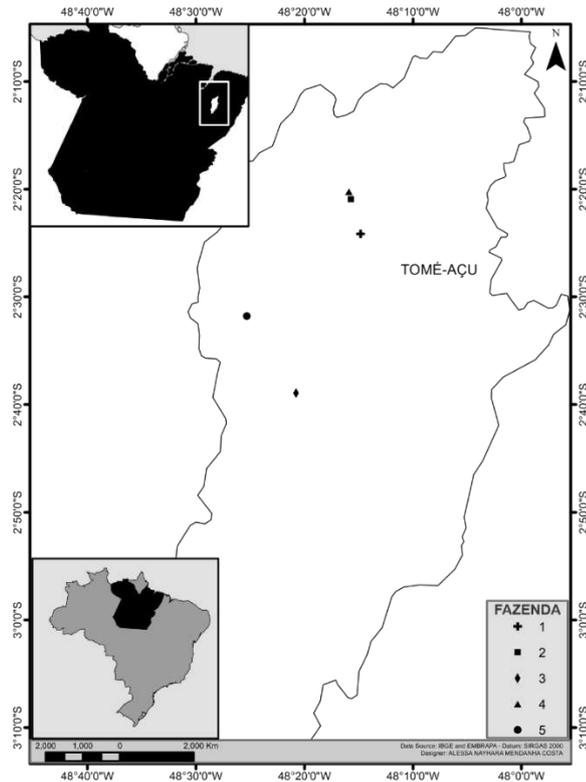


Figura 6 Mapa de localização das fazendas em Tomé-Açu.

No ano de 2008, foi aplicado um total de $1,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico para corrigir a acidez do solo nas áreas dos SAFs. A adubação nas covas de plantio de palma de óleo e na faixa diversificada envolveu uma combinação de 0,3 kg de fosfato natural reativo de Arad e 10 kg de carvão moído (conforme descrito na Tabela 4). A adubação de manutenção para as áreas de SAF foi realizada conforme as especificações da Tabela 4. A biomassa proveniente das podas das espécies na faixa diversificada foi regularmente depositada sobre solo desta zona de manejo. Nas áreas de SAF e monocultura, as folhas podadas da palmeira de óleo foram depositadas próximo das linhas da palma de óleo.

Nas fazendas 1, 2 e 3 estavam presentes florestas em regeneração adjacentes aos SAFs e as utilizamos como referência para comparação. A floresta da fazenda 1 tinha 30 anos de idade e foi estabelecida após repetidos ciclos de cultivo de *Piper nigrum*. A fazenda da floresta 2 tinha aproximadamente 20 anos de idade e o histórico de uso é desconhecido. A fazenda da floresta 3 tinha aproximadamente 40 anos de idade e se desenvolveu após ciclos de corte e queima.

Nas fazendas 4 (monocultivo 1) e 5 (monocultivo 2), os monocultivos tinham 16 e 11 anos de idade, respectivamente. O monocultivo 1 foi implantado após a conversão de uma floresta em regeneração de aproximadamente 13 anos, que foi formada após

repetidos ciclos de agricultura de corte e queima. O preparo de área para esse monocultivo foi a supressão florestal com trator esteira seguida da queima do material. O monocultivo 2 foi implantado em uma área de pastagem degradada cujo preparo de área envolveu queima da vegetação.

Antes do plantio das mudas de palma de óleo no monocultivo em 2006, foram aplicados 800 g de superfosfato triplo por cova de plantio. No ano seguinte, em 2007, aplicaram-se 200 g de ureia, 100 g de cloreto de potássio (KCl), 100 g de sulfato de magnésio (MgSO₄), 13 g de bórax e 8 g de fonte de micronutrientes (Zincop 101) por planta. A adubação de manutenção ocorreu semestralmente com 1 kg de NPK (13:11:21) por planta. Em 2018 foi realizada calagem no monocultivo 1 para correção da acidez do solo. Dados de fertilidade e a textura do solo dos sistemas de cobertura do solo estão apresentados na Tabela 5.

Os SAFs diferiam entre si pela composição de espécies (Tabela 6). Os SAFs no qual predominavam *G. sepium* e *I. edulis* são chamados SAFs-A e os que predominavam *T. cacao* são chamados SAFs-B. Inicialmente, os SAFs diferiam em função da diversidade de espécies; os SAFs-A eram os menos diversificados. No entanto, foram plantadas novas espécies nos SAFs-A das fazendas 1 e 3, aumentando a diversidade da vegetação nessas áreas.

Todos os SAFs eram compostos por linhas duplas de palma de óleo intercaladas por faixas diversificadas. Nas linhas duplas de palma de óleo, foram plantadas mudas de aproximadamente 15 meses de idade e 2 m de altura, em disposição de triângulo equilátero (9.0 x 9.0 x 9.0 m). As faixas diversificadas tinham 15 m de largura, exceto a do SAF-B da fazenda 1, que tinha 21 m; nessas faixas a distância entre indivíduos de *T. cacao* era 3 m; nas linhas de *T. cacao* estão intercaladas espécies florestais separadas por 5 m.

Tabela 4 Histórico de aplicação de fertilizantes e calcário em sistemas agroflorestais baseados em palmeira de óleo em Tomé-Açu, na Amazônia oriental, Brasil.

Calcário / fertilizante	Unidade	Área de coroamento da palmeira de óleo													Faixa diversificada					
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2008	2016	2017	2018	2019	2020
Calcário dolomítico ^d	kg ha ⁻¹														1300 ^b			2067 ^a		
Fosfato natural de ARAD ^e	kg planta ⁻¹	0.3		1	1.5							0.7	2.5	3.0	0.3 ^a	0.2 ^a	0.7 ^a	2.5 ^a	0.9 ^a	
Moinha de carvão ^f	kg planta ⁻¹	10													10 ^b					
Cama de frango ^g	kg planta ⁻¹														10 ^b					
Farinha de ossos ^h	kg planta ⁻¹		1	0.5	0.5															
Torta de mamona ⁱ	kg planta ⁻¹		2	2	4															
Torta de dendê ^j	kg planta ⁻¹								30	30	40				1.0 ^a	1.0 ^a	5.5 ^a	2.5 ^a		
FTE BR12 ^k	kg planta ⁻¹			0.3	0.2															
Cachos vazios de palmeira de óleo ^l	kg planta ⁻¹			100	221	150	200	240	240					150						
Bórax ^m	kg planta ⁻¹	10		0.1																
Composto orgânico ⁿ	kg planta ⁻¹		40												40 ^b					
Yoorin ^o	kg planta ⁻¹								1.5											
Produbor 10 ^p	kg planta ⁻¹									0.1	0.15	0.15			0.1 ^c		0.10 ^a	0.15 ^a	0.10 ^a	
Polissulfato de potássio ^q	kg planta ⁻¹										2.6	9				0.10 ^a	1.28 ^a	0.7 ^a		
Sulfato de potássio ^r	kg planta ⁻¹	40					0.8	0.8	0.4	1.8				2.0			0.1 ^a	0.45 ^a	0.5 ^a	

^a *Theobroma cacao* e *Euterpe oleracea* (Fazendas 1 e 2);
Theobroma cacao (Fazenda 3)
^b Fertilizante aplicado em toda faixa
^c *Euterpe oleracea* (Fazendas 1 e 2)
^d Mg: 12%; Ca: 38%
^e P: 10%; Ca: 37%
^f K: 5.9%; Mg: 2.8%; Ca: 15.40%
^g N: 2.58%; P: 2.27%; K: 2.31%; Mg: 0.44%; Ca: 30%
^h N: 2%; P: 20%; K: 0.12%; Mg: 0.24%; Ca: 30%
ⁱ N: 5.44%; P: 1.91%; K: 1.54%; Mg: 0.5%; Ca: 1.8%
^j N: 2.4%; P: 0.56%; K: 0.61%; Mg: 0.01%; Ca: 4%; S: 0.4%; Zn:
0.01%; B: 0.05%
Fonte: Alessa Mendanha

^k B: 1.8 %; Cu: 0.85%; Mn: 2.0%; Zn: 9.0%; S: 3.9%
^l N: 0.33%; P: 0.04%; K: 0.55%; Mg: 0.09%; Ca:0.28 %; S:
0.04%
^m B: 20.8%; B₂O₃: 67%
ⁿ N: 0.80%; P: 0.40%; K: 0.30%; Mg: 0.10%; Ca: 0.23%; S:
0.03%
^o P: 16%; Mg: 7%; Ca: 18%; S: 6%; Zn: 0.55%; B: 0.1%
^p B: 10%
^q K: 14.0%; Mg: 3.5%; Ca: 12%; S: 19%
^r K: 50%; S: 18%

Tabela 5 Caracterização química e granulométrica dos solos em diferentes sistemas de cobertura do solo em Tomé-Açu, na Amazônia Oriental, Brasil.

Fazenda	Sistema de cobertura do solo	pH (CaCl ₂)	P (Mehlich-I)	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al	CTC	V	Areia	Silte	Argila	Textura
-	-	-	mg dm ⁻³				cmolc dm ⁻³			%	g kg ⁻¹			-
1	SAF-B	5.1	34.8	40.6	4.1	1.1	0.0	3.8	9.1	57.8	620	135	245	Média
	SAF-A	5.0	16.9	39.1	3.6	1.1	0.0	3.9	8.7	54.1	585	140	275	Média
	Floresta	4.3	15.0	40.0	1.7	0.5	0.2	5.2	7.4	30.8	770	110	120	Arenosa
2	SAF-B	5.0	32.0	30.9	3.9	1.0	0.0	3.8	8.7	55.4	678	133	190	Média
	SAF-A	5.0	22.4	25.9	4.0	1.1	0.0	3.4	8.5	59.5	690	133	178	Média
	Floresta	4.4	1.3	51.0	2.0	0.6	0.2	5.0	7.7	33.3	710	90	200	Média
3	SAF-B	5.2	30.3	21.5	3.5	1.1	0.0	2.6	7.2	62.9	755	105	140	Arenosa
	SAF-A	5.1	14.2	24.6	3.4	1.1	0.0	3.1	7.6	59.0	680	107	213	Média
	Floresta	3.73	3.75	78.00	0.33	0.10	0.60	5.75	6.38	10.25	810	70	120	Arenosa
4	Monocultivo	4.4	11.5	33.3	1.9	0.5	0.2	4.4	6.9	35.0	557	153	290	Média
5	Monocultivo	4.5	10.2	31.3	1.8	0.6	0.1	3.6	6.1	40.2	850	57	93	Arenosa

3.2.2 Desenho Experimental

Em 2022, estabelecemos quatro parcelas ao acaso em cada sistema de cobertura do solo. Nos SAFs, as parcelas mediam 30 x 30 m e compreendiam uma linha dupla de palma de óleo (área de coroamento da palma de óleo - ACP, carreador - CAR e empilhamento - PIL) e duas faixas diversificadas (DIV) (Figura 7); cada zona ocupava uma porcentagem da área da parcela, o que foi extrapolado para o sistema como um todo (Tabela 7). Nos monocultivos, as parcelas mediam 30 x 30 m e compreendiam duas linhas duplas de palma de óleo. Nos SAFs e monocultivos, fizemos a amostragem em cada zona de manejo. Nas florestas, as parcelas mediam 10 x 10 m e não tinham zonas definidas; então as amostras foram coletadas em um ponto aleatório em cada parcela. Coletamos com trado de aço cinco amostras simples para formar uma amostra composta na profundidade 0-10 cm.

Tabela 6 Espécies vegetais consorciadas com a palma de óleo em sistemas agroflorestais em três fazendas em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Espécie	Família	Fazenda 1		Fazenda 2		Fazenda 3	
		SAF -A	SAF -B	SAF -A	SAF -B	SAF -A	SAF -B
<i>Acacia mangium</i> Willd.	Fabaceae				x	x	x
<i>Adenantha pavonina</i> L.	Fabaceae		¹ x		x	x	
<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	Moraceae					x	
<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	Meliaceae		x				
<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Lecythidaceae		x			x	
<i>Bixa orellana</i> L.	Bixaceae					x	x
<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	Calophyllaceae				x		
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Meliaceae	x	x		x	x	
<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	Arecaceae	x	x	x	x	x	x
<i>Euterpe oleracea</i> Mart.	Arecaceae		x		x		
<i>Gliricidia sepium</i> Jacq.	Fabaceae	x		x		x	x
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Fabaceae		x				
<i>Inga edulis</i> Mart.	Fabaceae	x	x	x		x	x
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D.Don	Bignoniaceae				x		
<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Lecythidaceae					x	
<i>Mangifera indica</i> L.	Anacardiaceae		x		x	x	
<i>Oenocarpus mapora</i> H. Karsten	Arecaceae		x		x		
<i>Piper nigrum</i> L.	Piperaceae	-					-
<i>Platonia insignis</i> Mart.	Cluciaceae						x
<i>Sclerolobium paniculatum</i> Vogel	Fabaceae				x		
<i>Spondias lutea</i> L.	Anacardiaceae				x	x	x
<i>Swietenia macrophylla</i> King	Meliaceae						x
<i>Tabebuia</i> sp.	Bignoniaceae	x	x		x		
<i>Theobroma cacao</i> L.	Malvaceae	x	x		x	x	x
<i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Spreng)	Malvaceae				x	x	x
<i>Virola surinamensis</i> (Rol. ex Rottb.) Warb.	Myristicaceae		x				

¹x representa a presença da espécie no sistema agroflorestal

Tabela 7 Área relativa (%) ocupada por cada zona de manejo nos sistemas de produção de palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil.

Fazenda	Sistema de produção	Área relativa ocupada por cada zona de manejo (%)			
		CAR	ACP	PIL	DIV
1	SAF-B	14.52	19.32	12.96	53.2
	SAF-A	20.84	29.51	19.8	29.85
2	SAF-B	18.92	21.79	12.54	46.75
	SAF-A	24.69	25.74	11.22	38.35
3	SAF-B	20.07	18.24	24.64	37.5
	SAF-A	20.5	21.57	20.5	37.2
4 e 5	Monocultivo	45.74	32.58	21.7	-

3.2.3 Preparo e análises de solo

O solo foi seco ao ar e peneirado a 2 mm para as análises de enzimas, CPOX e fertilidade. O solo foi moído a 100 mesh para a determinação de COT e 80 mesh para a determinação de MOS. Uma amostra de solo fresco foi separada previamente, mantida em refrigeração (4 °C) por no máximo duas semanas e peneirada a 2 mm para análise da respiração microbiana.

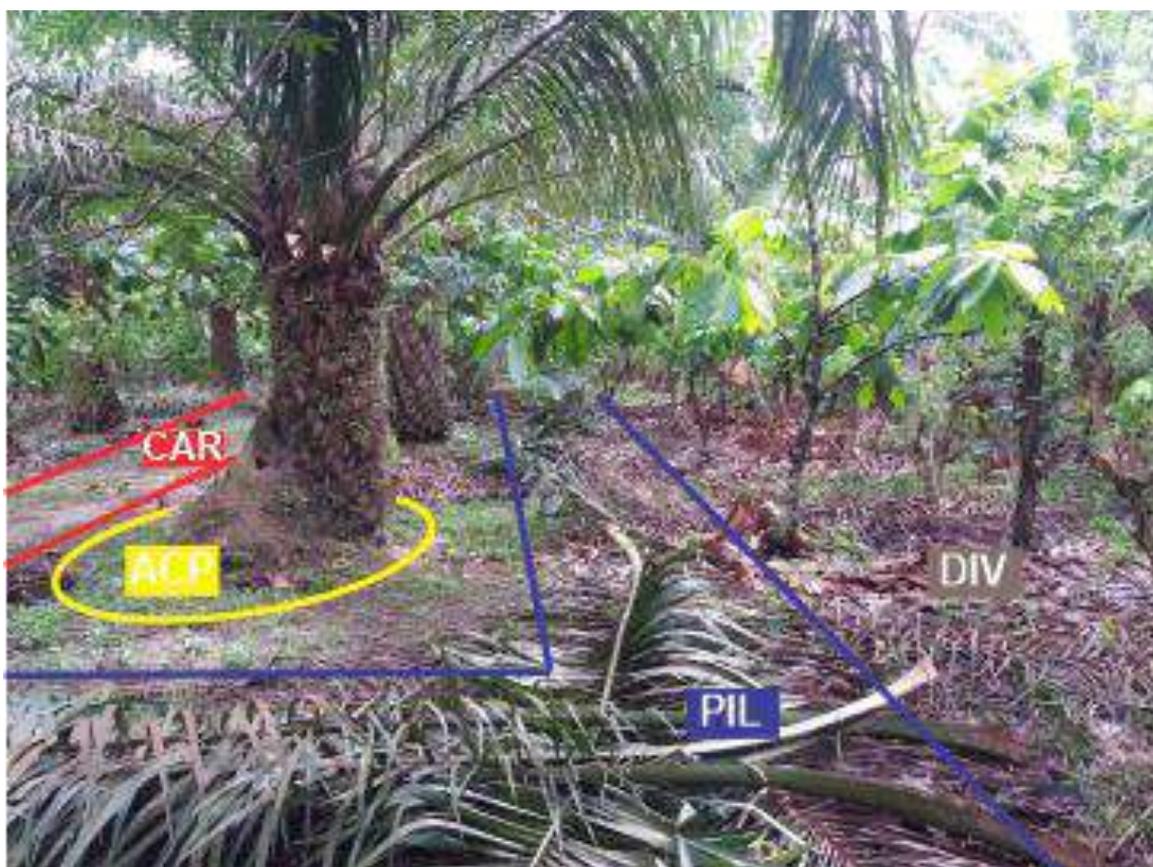


Figura 7 Locais de coleta (zonas de manejo) nos sistemas agroflorestais com palma de óleo. Caminho da colheita – CAR, área de coroamento da palma de palma de óleo – ACP, empilhamento de folhas podadas de palma de óleo – PIL e faixa diversificada – DIV.

Determinamos a atividades das enzimas Beta-glucosidase e Arylsulfatase de acordo com Tabatai (1994). Incubamos 1 g de solo por 1 h em 1 mL de solução tampão contendo substrato cromogênico de *p*-nitrophenyl. Quantificamos o CPOX segundo (WEIL et al., 2003): 2.5 g de solo foram submetidos à oxidação por permanganato de potássio a 0,003 M e as amostras foram lidas a 550 nm em espectrofotômetro (BioSpectro). O teor de COT foi quantificado por combustão via seca em analisador elementar (Vario MACRO Cube).

Pesamos 5 g de solo seco ao ar em cadinho de porcelana para determinar o teor de MOS pelo método de perda por ignição (TEIXEIRA et al., 2017), em mufla a 600 °C por 6h.

Determinamos a respiração basal segundo (SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI, 2007). Incubamos por 10 dias 10 g de solo fresco em um recipiente hermeticamente fechado. Determinamos a quantidade de CO₂ produzido pelos microrganismos por titulação com HCl a 0.5 M.

Os indicadores de fertilidade foram determinados segundo Teixeira et al. (2017). O pH foi determinado na proporção de 10 g de solo: 25 mL de CaCl₂ 0.01M. Ca, Mg e Al foram extraídos com KCl a 1 M e analisados por titulação. K e P foram extraídos com Melich-I e quantificados por fotometria de chama e espectrofotometria, respectivamente. H + Al foi extraído com acetato de cálcio a 0.5 M a pH 7.0 e determinado por titulação.

3.2.4 Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram executadas com o Software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022). Usamos modelo linear misto (nlme pacote) seguido de análise de contraste ortogonal (CRAWLEY, 2013) para testar os efeitos dos sistemas de cobertura do solo sobre os indicadores de saúde do solo. Os modelos lineares mistos são mais adequados e robustos para modelos hierárquicos (ZUUR et al., 2009) como o nosso design amostral (Figura 8). Como efeitos fixos, nossas variáveis respostas foram: Beta-glucosidase, Arylsulfatase, CPOX, COT, RM e MOS. Como fatores aleatórios, utilizamos as variáveis fazendas (g1) e os sistemas de cobertura do solo (sistemas agroflorestais, florestas e monocultivos) dentro das fazendas (g2) e, dependendo do modelo, usamos somente as fazendas (g1). Utilizamos a função *lme* do pacote *lme4* para construir os modelos lineares mistos (BATES et al., 2015) e a função *Anova* do pacote *car* para executar o teste de significância Tipo II Wald Qui-quadrado. Avaliamos as associações entre as variáveis pela correlação de Pearson usando a função *ggcorrplot.mixed* do pacote *ggcorrplot*. Para calcular os valores médios das variáveis por parcela, consideramos a área relativa (%) ocupada por cada zona de manejo (Tabela 7); mais detalhes sobre o cálculo podem ser encontrados em (COSTA et al., 2023).

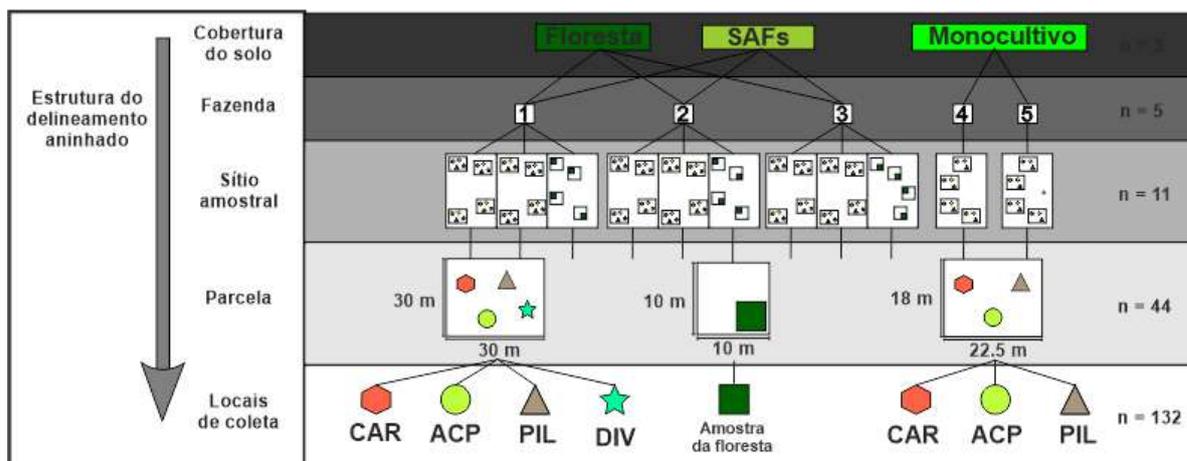


Figura 8 Ilustração esquemática dos locais de coleta do delineamento aninhado. Caminho da colheita – CAR, área de coroamento da palma de palma de óleo – ACP, empilhamento de folhas podadas de palma de óleo – PIL e faixa diversificada – DIV.

3.3 Resultados

3.3.1 Efeitos dos tipos de cobertura do solo nos indicadores de saúde do solo

Os indicadores de saúde do solo apresentaram padrões distintos de variação entre os sistemas de cobertura do solo: SAF > floresta = monocultivo para COT (Figura 9A, Tabela 8); SAF > floresta > monocultivo para Beta e CPOX (Figura 9B e D, respectivamente, Tabela 8) e; SAF = floresta > monocultivo para Aryl (Figura 2C, Tabela 8). Os sistemas de cobertura do solo não afetaram significativamente MOS e RM (Tabela 8).

Tabela 8 Tabela de análise de deviance (teste do Tipo II) dos indicadores de saúde do solo nos sistemas de cobertura do solo (monocultivo, sistema agroflorestal e floresta).

Efeito fixo				Efeito aleatório	
Resposta	Qui-q	Pr(>Qui-q)	gl	g1	g2
Beta	24.149	<0.001	2	5	11
Aryl	6.089	0.048	2	5	11
CPOX	24.736	<0.001	2	5	11
RM	0.660	0.718	2	5	11
MOS	5.10	0.077	2	5	11
COT	11.299	0.003	2	5	11

Nota: Efeito aleatório: $\sim 1|g1/g2$, onde o intercepto varia entre g1 e g2 dentro de g1. Os dados relacionados a esta análise estão apresentados na Figura 2.

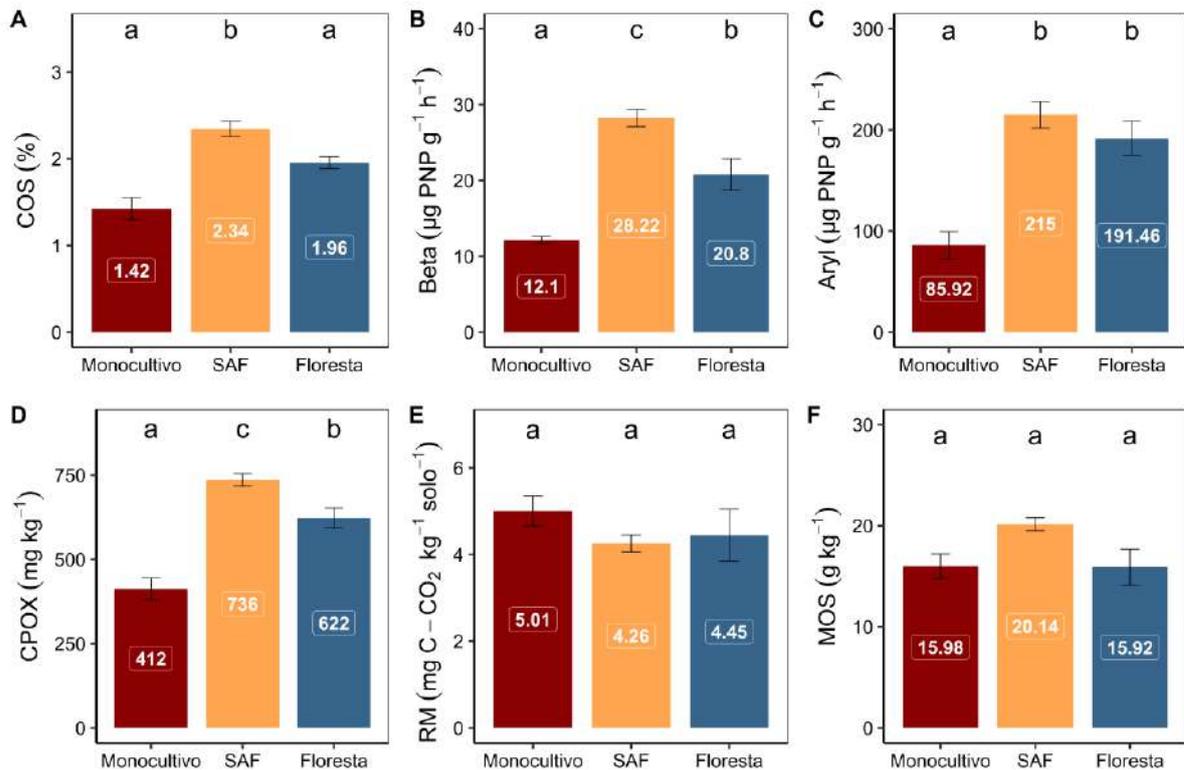


Figura 9 A Carbono orgânico total do solo (COT), B beta-glucosidase (Beta), C arylsulfatase (Aryl), D carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), E respiração microbiana (RM) e F matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes sistemas de cobertura do solo (monocultivo, sistema agroflorestal – SAF, floresta) em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre médias baseadas na análise de contraste. Barras são média ± erro padrão.

3.3.2 Efeitos dos tipos de sistemas de produção de palma de óleo nas zonas de manejo

Os indicadores de saúde do solo apresentaram três padrões de variação entre zonas de manejo dentro dos sistemas agroflorestais: PIL > DIV = ACP > CAR para COT, Beta e Aryl (Figura 10A, B e C, respectivamente, Tabela 6); PIL > DIV > ACP > CAR para CPOX (Figura 10D, Tabela 9) e; ACP = PIL > DIV = CAR para MOS Figura 10F, Tabela 9).

Tabela 9 Tabela de análise de deviance (teste do Tipo II) dos indicadores de saúde do solo nas zonas de manejo (carreador, área de coroamento e empilhamento) dos sistemas de cultivo da palma de óleo (sistema agroflorestal e monocultivo).

Efeito fixo	Sistema agroflorestal			Efeito aleatório		Monocultivo		Efeito aleatório	
	Resposta	Qui-q	Pr(>Qui-q)	gl	g1	g2	Chisq	Pr(>Chisq)	g1
Beta	43.846	<0.001	3	3	6	9.969	0.007	2	2
Aryl	78.210	<0.001	3	3	6	22.612	<0.001	2	2
CPOX	54.391	<0.001	3	3	6	16.074	0.000	2	2

RM	3.073	0.381	3	3	6	0.227	0.893	2	2
MOS	17.53	0.001	3	3	6	2.942	0.230	2	2
COT	52.182	<0.001	3	3	6	15.584	0.000	2	2

Nota: Efeito aleatório: $\sim 1|g1/g2$, onde o intercepto varia entre $g1$ e $g2$ dentro de $g1$. Os dados relacionados a esta análise estão apresentados nas Figuras 10 e 11.

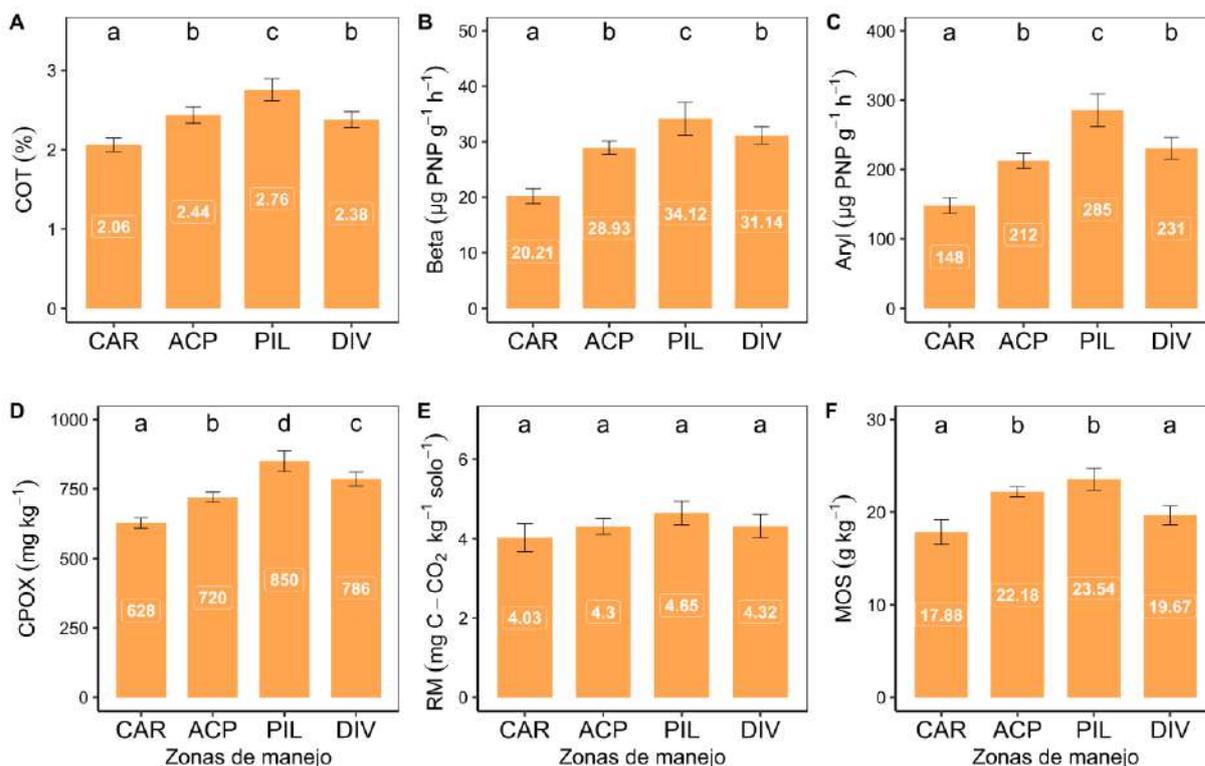


Figura 10 A Carbono orgânico total do solo (COT), B beta-glucosidase (Beta), C arylsulfatase (Aryl), D carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), E respiração microbiana (RM) e F matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes zonas de manejo (caminho da colheita – CAR, área de coroamento da palma de óleo – ACP, empilhamento de folhas de palma de óleo – PIL e faixa diversificada – DIV) de sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-açu, Amazônia oriental, Brasil. Os valores em branco dentro das barras de erro representam as médias. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre médias baseadas na análise de contraste. Barras são média \pm erro padrão.

Entre as zonas de manejo no monocultivo, os indicadores de saúde do solo apresentaram dois padrões de variação: (1) PIL > ACP = CAR para COT, Aryl e CPOX (Figura 11A, C e D, respectivamente, Tabela 9); e (2) PIL = ACP > CAR para Beta (Figura 11B, Tabela 9). RM não variou entre as zonas de manejo, tanto nos SAFS como nos monocultivos (Tabela 9).

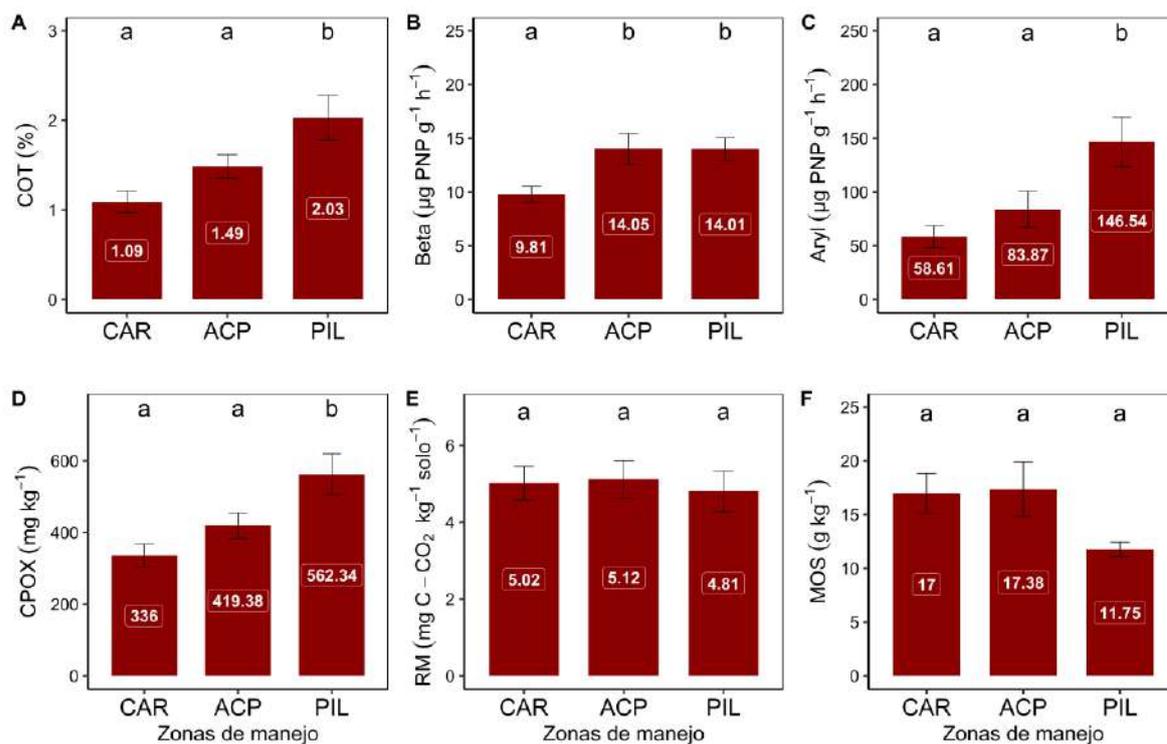


Figura 11 A Carbono orgânico total do solo (COT), B beta-glucosidase (Beta), C arylsulfatase (Aryl), D carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), E respiração microbiana (RM) e F matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes zonas de manejo (caminho da colheita – CAR, área de coroamento da palma de óleo – ACP e empilhamento de folhas de palma de óleo – PIL) de monocultivos de palma de óleo em Tomé-açu, Amazônia oriental, Brasil. Os valores em branco dentro das barras de erro representam as médias. Letras diferentes indicam diferenças significativas baseadas na análise de contraste. Barras são média \pm erro padrão.

As zonas de manejo dos SAFs apresentaram maiores níveis de COT, Beta, Aryl e CPOX em comparação com as zonas de manejo no monocultivo (Figura 5A, B, C e D, respectivamente, Tabela 10). Contudo, os valores de Aryl (Figura 5A) e COT (Figura 5C) da PIL não variaram entre as zonas manejo entre SAFs e monocultivo. A MOS da PIL e da ACP foi maior nos SAFs do que no monocultivo. RM nas zonas de manejo não variou entre SAFs e monocultivo (Tabela 10).

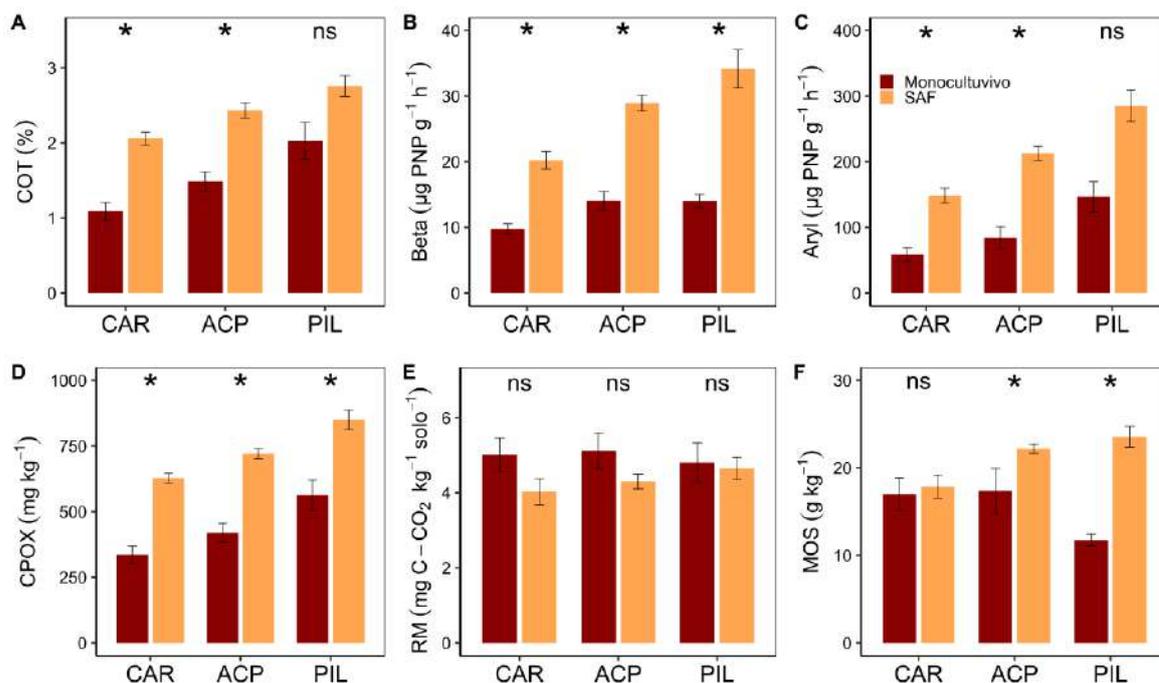


Figura 12 A Carbono orgânico total do solo (COT), B beta-glucosidase (Beta), C arylsulfatase (Aryl), D carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), E respiração microbiana (RM) e F matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes zonas de manejo (caminho da colheita – CAR, área de coroamento da palma de óleo – ACP e empilhamento de folhas de palma de óleo – PIL) de sistemas de cultivo de óleo em Tomé-açu, Amazônia oriental, Brasil. “*” Indica efeito significativo e “ns” indica efeito não significativo baseado no modelo linear misto. Barras são média ± erro padrão.

Tabela 10 Tabela de análise de deviance (teste do Tipo II) dos indicadores de saúde do solo entre os sistemas de cultivo de palma de óleo (SAF e monocultivo) em cada zona de manejo (CAR, ACP e PIL).

Efeito fixo	CAR		ACP		PIL		gl	Efeito aleatório	
	Qui-q	Pr(>Qui-q)	Qui-q	Pr(>Qui-q)	Qui-q	Pr(>Qui-q)		g1	g2
Beta	5.914	0.015	15.129	0.000	4.223	0.040	1	5	8
Aryl	4.665	0.031	9.628	0.002	1.924	0.165	1	5	8
CPOX	20.453	<0.001	31.502	<0.001	4.189	0.041	1	5	8
RM	0.961	0.327	3.492	0.062	0.045	0.832	1	5	8
MOS	0.07	0.7979	8.05	0.004	14.13	<0.001	1	5	8
COT	8.8912	0.002865	6.4333	0.0112	1.6738	0.1957	1	5	8

Nota: Efeito aleatório: $\sim 1|g1/g2$, onde o intercepto varia entre g1 e g2 dentro de g1. Os dados relacionados a esta análise estão apresentados na Figura 12.

3.3.3 Variação relativa dos indicadores de saúde do solo entre sistemas de cobertura do solo e entre zonas manejo

Os valores de COT, Beta, Aryl, CPOX e MOS foram aproximadamente 19, 36, 12, 18, 26% maior no SAF em relação a floresta (Figura 13A). A RB foi 4% menor no SAF quando comparado à floresta. O monocultivo apresentou redução de 27, 42, 55, 34 e 0.5 % no COT, Beta, Aryl, CPOX e MOS em comparação com floresta; a RM do monocultivo superou a da floresta em 13%.

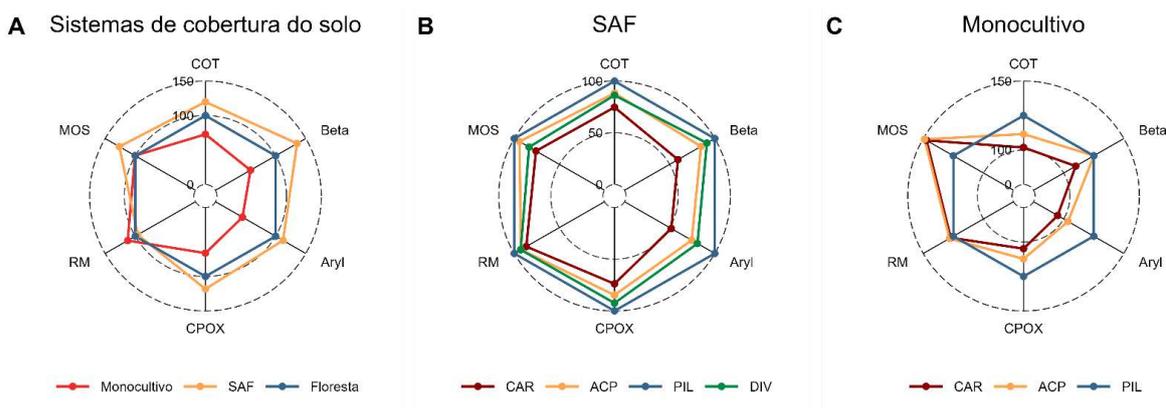


Figura 13 Variação percentual dos atributos químicos dos sistemas agroflorestais com palma de óleo em relação à floresta (A); das zonas de manejo (CAR, ACP e DIV) em relação a PIL no sistema agroflorestal -SAF (B) e no monocultivo (C). A linha vermelha representa o valor encontrado no solo da floresta e do empilhamento correspondem a 100%. SAF significa sistema agroflorestal.

Nos SAFs, CAR, ACP e DIV apresentaram redução em comparação a PIL para todas as variáveis estudadas: COT: 25, 12 e 14%; na Beta 41, 15 e 9 %; Aryl: 48, 26, e 19%, CPOX: 26, 15 e 7%; RM: 13, 7 e 7% e MOS: 24, 6 e 16%, respectivamente (Figura 13B).

No monocultivo, em relação a PIL, CAR e ACP apresentaram redução em COT, Aryl e CPOX (Figura 13C). A redução para CAR e ACP em COT foi: 46 e 27 %; Aryl: 60 e 43%, CPOX: 26, 15, 7%, respectivamente. Beta apresentou redução de 30 % para CAR comparado a PIL. RM e MOS apresentaram incrementos em CAR e ACP comparados a PIL; RM: 4 e 7% e MOS: 45 e 48%, respectivamente.

3.3.4 Correlação

Das 15 correlações possíveis, 5 apresentaram $r > 0.71$, 5 apresentara $0.31 < r > 0.70$ e 5 apresentaram $r < 0.30$ (Figura 14). Todas as correlações significativas foram positivas. COT apresentou correlação forte com Aryl e CPOX, e moderada com Beta. Beta apresentou correlação forte com Aryl e CPOX. RM apresentou somente correlações fracas e não

significativas com as demais variáveis. MOS apresentou correlações significativas com COT, Beta, Aryl e CPOX, porém foram correlações moderadas.

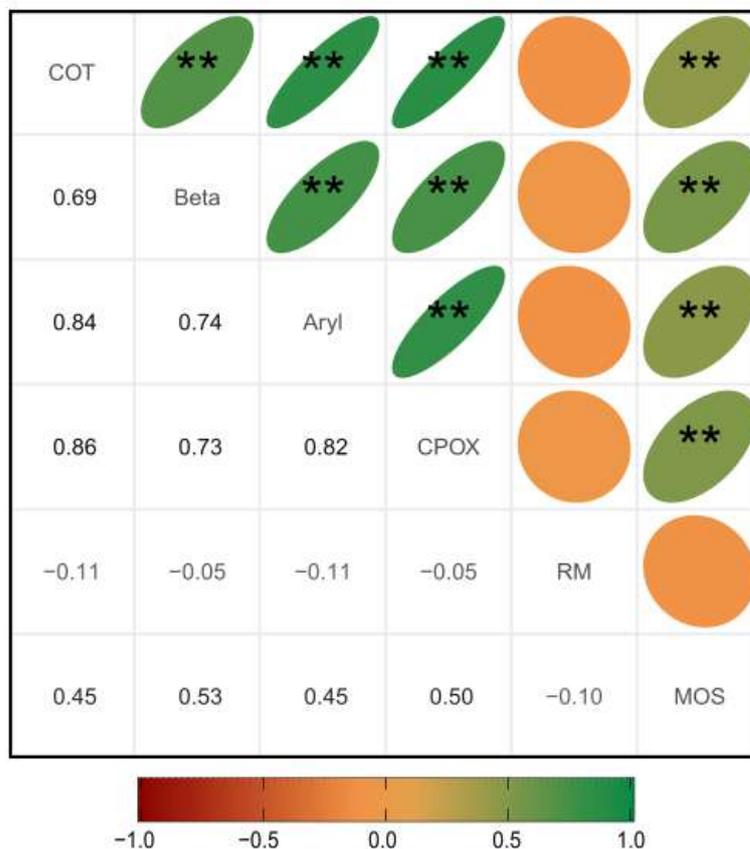


Figura 14 Correlação de Pearson entre carbono orgânico total do solo (COT), beta-glucosidase (Beta), arylsulfatase (Aryl), carbono do solo oxidável por permanganato de potássio (CPOX), respiração microbiana (RM) e matéria orgânica do solo (MOS) nos sistemas de cobertura do solo (monocultivo de palma de óleo, sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta) em Tomé-Açu, Amazônia oriental, Brasil. **representam efeito significativo ($p < 0.05$).

3.4 Discussão

3.4.1 Atividade enzimática varia entre os sistemas de cobertura do solo

A beta-glucosidase é uma enzima envolvida na conversão de celobiose (dissacarídeo glicosil-glicose) e oligossacarídeos em glicose, que é fonte de energia para a comunidade microbiana do solo (KARACA et al., 2010; NIELSEN; WINDING, 2002). Logo, maiores níveis de Beta no solo indicam uma maior taxa de mineralização e incorporação de C ao solo. A arylsulfatase está envolvida na mineralização de enxofre (S). Visto que mais de 90% do S no solo está na forma orgânica, a mineralização dos compostos orgânicos é um processo chave para a disponibilização de S para as plantas. A mineralização do S ocorre por meio da liberação

de arylsulfatase pelos microrganismos e essa enzima catalisa a hidrólise dos sulfatos orgânicos (KARACA et al., 2010). Portanto, sistemas que apresentam maior aporte de material orgânico tendem a apresentar maior atividade da arylsulfatase (DENG; TABATABAI, 1997; IKOYI et al., 2020).

A maior atividade de Beta e Aryl nos SAFs e floresta em relação ao monocultivo podem ser explicados pelo maior aporte de nutrientes ao solo do SAF e da floresta pela manutenção da camada de serapilheira e da maior diversidade de espécies de plantas (que contribuem com a adição do material do *litterfall* e sistemas radiculares), assim como sugerido em estudos anteriores nas mesmas áreas (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021, 2024; MAIA et al., 2021). Enquanto no monocultivo a adição de carbono é feita principalmente pelos sistemas radiculares da palma de óleo. A combinação de adubação orgânica, manutenção da serapilheira, poda e diversidade de sistemas radiculares encontrada nos SAFs deve promover um microecossistema adequado para a atividade dos microrganismos do solo, o que leva a maior exsudação de enzimas, como observamos para Beta e Aryl nos SAFs. Práticas conservacionistas como manutenção da cobertura do solo (HOK et al., 2018; SÁ et al., 2018), maior diversidade de espécies (DE CARVALHO MENDES et al., 2012) e adubação orgânica (BOWLES et al., 2014; IKOYI et al., 2020) favorecem o aumento da atividade das enzimas do solo. No monocultivo de palma de óleo, o aporte de carbono é majoritariamente abaixo do solo pela ciclagem de raízes. Desse modo, sugerimos que a diversidade de fontes de C nos SAFs e na floresta favorece o aumento das atividades das enzimas do solo em relação ao monocultivo.

3.4.2 Mudanças em COT e CPOX entre os sistemas de cobertura do solo

Confirmamos a hipótese de que o sistema agroflorestal com palma de óleo apresenta maior nível de COT e CPOX em comparação à floresta e ao monocultivo. Estudo realizado nas mesmas áreas reportou padrão semelhante para COT (SAF = Floresta > Monocultivo) e CPOX (SAF > FOR = monocultivo) (GOMES et al., 2021). Sugerimos que os valores mais altos de COT e CPOX nos SAFs se devem aos mesmos fatores que controlam a atividade das enzimas do solo no nosso estudo, ou seja, a diversidade de espécies plantadas (*litterfall* e sistemas radiculares), poda e adubação orgânica. As variadas fontes de C nos SAFs contribuem para o aumento de C no solo por meio de (1) acúmulo de camada de serapilheira formada pelo material do *litterfall* e da poda de *T. cacao*, o *litterfall* nos SAFs varia entre 7.1 e 8.0 Mg ha⁻¹ year⁻¹ (COSTA, 2017), enquanto no monocultivo de palma de óleo o *litterfall* é insignificante; e (2)

da adubação orgânica, que é uma fonte extra de C e nutrientes para o solo; esse tipo de adubação favorece o aumento do C do solo em sistemas de cultivo de palma de óleo (MARDEGAN et al., 2022; RAHMAN et al., 2021). Portanto, a manutenção da serapilheira e a adubação orgânica devem criar um ambiente favorável para o crescimento da comunidade de organismos do solo (TAO et al., 2018) e, conseqüentemente, uma maior incorporação de C.

3.4.3 Distribuição espacial dos indicadores de saúde do solo em sistemas de cultivo de palma de óleo

Os maiores valores de atividade de enzimas e teores de carbono encontrados no empilhamento em comparação às demais zonas é consistente com o fato do empilhamento ser a zona de manejo que apresenta melhor saúde do solo em sistemas de produção de palma de óleo (GOMES et al., 2021; NELSON et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2022; RAHMAN et al., 2021). Diversos estudos reportam maior estoque de raízes (RAMOS et al., 2018; RÜEGG et al., 2019), estoque e teor de carbono (GOMES et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022) e atividade de organismos do solo (MAIA et al., 2021) no empilhamento em comparação com coroamento e carreador. Estudos anteriores nas mesmas áreas desta pesquisa relataram que, no empilhamento dos SAFs, além das folhas de palma de óleo sobre o solo, são encontradas raízes e folhas de *T. cacao* (RAMOS et al., 2018), além de menor densidade do solo, maior umidade e porosidade total (OLIVEIRA et al., 2022), desse modo, sugerimos que esses fatores mencionados promovem uma melhor saúde do solo.

Beta, CPOX e MOS foram capazes de detectar diferenças entre SAFs e monocultivo no empilhamento. Estudo realizado na fazenda 3 deste estudo reportou resíduos de raízes e folhas de *T. cacao* no empilhamento (RAMOS et al., 2018), o que pode ser uma fonte adicional de material orgânico nessa zona em comparação ao monocultivo, que não apresenta outras espécies além da palma de óleo. Sugerimos que a presença de outras espécies nos SAFs favorece o aumento de Beta, CPOX e MOS que são reflexo da maior quantidade de matéria orgânica e da atividade microbiana.

A faixa diversificada e a área de coroamento apresentaram níveis intermediários dos indicadores de saúde do solo em relação ao empilhamento e ao carreador. As principais fontes de carbono na DIV são a deposição constante de material orgânico, proveniente do litterfall do *T. cacao* e das outras espécies, além dos sistemas radiculares das plantas presentes nessa zona; em ACP, a principal fonte é o sistema radicular da palma de óleo. Nessas duas zonas nos SAFs, além das fontes mencionadas, há a aplicação dos adubos orgânicos. A cobertura permanente do

solo e a utilização de adubos orgânicos geralmente promovem um ambiente com temperatura, umidade e disponibilidade de nutrientes (TAO et al., 2018) favoráveis para a atividade dos organismos do solo e, conseqüentemente, para a ciclagem de C (MARDEGAN et al., 2022). Desse modo, sugerimos que os níveis indicadores de saúde do solo na faixa diversificada e na área de coroamento se devem às entradas de carbono acima (*litter*, material da poda e adubação orgânica) e abaixo (ciclagem de raízes) do solo.

Confirmamos nossa hipótese de menores valores de indicadores de saúde do solo encontrados no CAR em relação as demais zonas. O carreador, em geral, apresenta menor saúde do solo do que PIL e ACP (FORMAGLIO et al., 2021; GOMES et al., 2021; RAHMAN et al., 2021). Contudo, CPOX e C total do solo foram superiores no CAR comparado a PIL e ACP em um sistema de cultivo de palma de óleo na Amazônia (NOIROT et al., 2022). Sugerimos que a adição reduzida de carbono e ausência de cobertura do solo associadas ao tráfego de maquinários deterioram a qualidade física do solo no carreador (OLIVEIRA et al., 2022; SOUZA et al., 2023). Essa deterioração resulta em uma redução da atividade de organismos do solo e, portanto, diminui a ciclagem de nutrientes que é realizada com auxílio das enzimas Beta e Aryl. Além disso, o baixo aporte de carbono orgânico reduz a quantidade de C no solo. No monocultivo, a Beta foi o único indicador que diferenciou a saúde dos solo entre CAR e ACP, o que pode representar uma maior responsividade da Beta ao material orgânico oriundo das raízes de palma de óleo, que estão mais presentes na área de coroamento e servem como fonte de C para o solo (RÜEGG et al., 2019).

Os maiores valores de Aryl, Beta, CPOX e COT no CAR dos SAFs em relação ao monocultivo podem ser uma consequência da utilização do controle mecânico das plantas espontâneas nos SAFs ao invés do controle químico aplicado no monocultivo. A aplicação de herbicidas causa impacto negativo na atividade da Beta (RIAH et al., 2014); reduz a diversidade da macrofauna do solo (ASHTON-BUTT et al., 2018), e acelera as taxas de decomposição, o que pode reduzir o armazenamento de carbono do solo. Portanto, o manejo conservacionista pode minimizar a redução da saúde do solo no carreador dos SAFs.

3.4.4 Correlação entre os indicadores de saúde do solo

O carbono orgânico do solo é frequentemente utilizado como referência para a condição da saúde de do solo (LAL, 2016). Assim, espera-se que os demais indicadores de saúde do solo sigam o mesmo padrão de COT. Em nosso estudo, de fato Beta, Aryl, CPOX e MOS seguiram o padrão de variação de COT, mas somente Aryl e CPOX apresentaram correlação forte com

COT. Desse modo, nossos resultados sugerem que Aryl e CPOX são os mais apropriados em termos de sensibilidade para identificar mudanças no COT em função dos diferentes sistemas de cobertura do solo e das zonas de manejo. Estudos confirmam nossos resultados que CPOX (BONGIORNO et al., 2019; CHRISTY et al., 2023; CULMAN et al., 2013; FINE; SCHINDELBECK, 2017) e Aryl são indicadores sensíveis para detectar alterações na saúde do solo.

Apresentamos um estudo observacional relevante para o cenário do cultivo de palma de óleo mundial, pois avaliamos sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia brasileira, onde se concentra a produção dessa oleaginosa no Brasil, o décimo maior produtor de óleo de palma no mundo. Reconhecemos que estudos observacionais têm limitações quando se trata de fornecer uma compreensão mais detalhada sobre os processos do solo, como aqueles que levaram a observação das diferenças nos indicadores de saúde do solo entre monocultivo, SAFs e floresta. Estudos futuros devem considerar uma abordagem fatorial que combine diferentes sistemas (SAFs e monocultivos) e fertilização (orgânica e convencional) para dar suporte a uma interpretação mecanicista do efeito desses fatores sobre os indicadores de saúde do solo. Além disso, para um panorama mais completo sobre a saúde do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia, sugerimos considerar a variação vertical dos indicadores de saúde do solo, pois as espécies perenes são capazes de aumentar os níveis de CPOX, COT e Aryl (SÁ et al., 2018) em camadas mais profundas. Recomendamos também que a evolução da saúde do solo nos sistemas de cultivo de palma de óleo seja acompanhada ao longo do tempo, visto que a palma de óleo tem um ciclo comercial longo.

3.5 Conclusão

Nossos resultados para COT, Beta, Aryl e CPOX indicam que sistemas agroflorestais com palma de óleo promovem incremento na saúde do solo em comparação com o monocultivo e a floresta. Esses indicadores mostram que as zonas de manejo com maior aporte de C (PIL, DIV e ACP) apresentam melhor saúde do solo. Na maioria das comparações, Beta, Aryl, CPOX e COT foram mais sensíveis que RM e MOS para diferenciar os sistemas de cobertura do solo e as zonas de manejo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. S. et al. Heterogeneity of tree diversity and carbon stocks in Amazonian oil

- palm landscapes. **Plant Ecology and Diversity**, v. 13, n. 1, p. 105–113, 2020.
- ALMEIDA, A. S.; VIEIRA, I. C. G.; FERRAZ, S. F. B. Long-term assessment of oil palm expansion and landscape change in the eastern Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 90, p. 104321, 2020a.
- ALMEIDA, A. S.; VIEIRA, I. C. G.; FERRAZ, S. F. B. Long-term assessment of oil palm expansion and landscape change in the eastern Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 90, n. June 2018, p. 104321, 2020b.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, L. A. et al. Soil chemical properties and crop response to gypsum and limestone on a coarse-textured Ultisol under no-till in the Brazilian Pampa biome. **Geoderma Regional**, v. 25, 2021.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. **Biogeosciences**, v. 6, n. 12, p. 2759–2778, 2009.
- ASHTON-BUTT, A. et al. Understorey vegetation in oil palm plantations benefits soil biodiversity and decomposition rates. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 1, n. December, 2018.
- ASMAH, S. et al. Effects of polyculture and monoculture farming in oil palm smallholdings on tropical fruit-feeding butterfly diversity. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 19, n. 1, p. 70–80, 2017.
- ATIQA, N. et al. Birds associated with different tree species and structures in oil palm agroforestry landscapes in Malaysia. **Emu**, v. 119, n. 4, p. 397–401, 2019.
- BAI, S. H. et al. Leaf litter species affects decomposition rate and nutrient release in a cocoa plantation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 324, n. October 2021, p. 107705, 2022.
- BARONA, E. et al. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 2, 2010.
- BATES, D. et al. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, 2015.
- BEILLOUIN, D. et al. **Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services**. [s.l: s.n.]. v. 27
- BENAMI, E. et al. Oil palm land conversion in Pará, Brazil, from 2006-2014: Evaluating the 2010 Brazilian Sustainable Palm Oil Production Program. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 3, 2018.
- BENBI, D. K. et al. Sensitivity of labile soil organic carbon pools to long-term fertilizer, straw and manure management in rice-wheat system. **Pedosphere**, v. 25, n. 4, p. 534–545, 2015.
- BESAR, N. A. et al. Carbon stock and sequestration potential of an agroforestry system in Sabah, Malaysia. **Forests**, v. 11, n. 2, p. 1–16, 2020.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems.

Australian Journal of Agricultural Research, 1995.

- BONGIORNO, G. et al. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, v. 99, n. November 2018, p. 38–50, 2019.
- BOWLES, T. M. et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 252–262, 2014.
- BRÉDOIRE, F. et al. Distributions of fine root length and mass with soil depth in natural ecosystems of southwestern Siberia. **Plant and Soil**, v. 400, n. 1–2, p. 315–335, 2016.
- BRIEDIS, C. et al. Preservation of labile organic compounds is the pathway for carbon storage in a 23-year continuous no-till system on a Ferralsol in southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 33, n. April, 2023.
- BRUUN, T. B. et al. Improved sampling methods document decline in soil organic carbon stocks and concentrations of permanganate oxidizable carbon after transition from swidden to oil palm cultivation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 178, p. 127–134, 2013.
- BÜNEMANN, E. K. et al. **Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry**, 2018.
- CALDERÓN, F. J. et al. Quantification of Soil Permanganate Oxidizable C (POXC) Using Infrared Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 2, p. 277, 2017.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.
- CARRON, M. P. et al. Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. **Soil Research**, v. 53, n. 2, p. 205–215, 2015.
- CARVALHO, W. R. et al. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 2, p. 357–368, 2014.
- CASTRO LOPES, A. A. et al. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, n. January, p. 72–82, 2018.
- CAVALCANTI, R. Q. et al. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, n. February, p. 114353, 2020.
- CHATTERJEE, N. et al. Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 266, n. August, p. 55–67, 2018.
- CHEN, Y. et al. Rotation and organic fertilizers stabilize soil water-stable aggregates and their associated carbon and nitrogen in flue-cured tobacco production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 1, p. 192–205, 2020.
- CHERUBIN, M. R. et al. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion

- areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, v. 173, n. 2017, p. 64–74, 2017.
- CHERUBIN, M. R.; CHAVARRO-BERMEO, J. P.; SILVA-OLAYA, A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 5, p. 1741–1753, 2019.
- CHRISTY, I. et al. A mechanistic inquiry into the applicability of Permanganate oxidizable Carbon (PoxC) as a soil health indicator. **Soil Science Society of America Journal**, n. July 2022, p. 1083–1095, 2023.
- COSTA, A. N. M. **Efluxo de CO₂ do solo em sistemas de produção de palma de óleo na Amazônia oriental**. [s.l: s.n.].
- COSTA, L. R. DE J. et al. Soil fertility in oil palm agroforestry systems in the Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, n. 0123456789, 2023.
- CRAWLEY, M. J. **The R Book**. 2. ed. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2013.
- CREWS, T. E.; RUMSEY, B. E. What agriculture can learn from native ecosystems in building soil organic matter: A review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 4, p. 1–18, 2017.
- CULMAN, S. W. et al. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil Fraction that is sensitive to management. v. 76, n. 2, 2012.
- CULMAN, S. W. et al. Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 2, p. 493–502, 2013.
- DA SILVA, R. B. et al. A soil quality physical–chemical approach 30 years after land-use change from forest to banana plantation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 7, 2022.
- DE CARVALHO MENDES, I. et al. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. **Plant and Soil**, v. 359, n. 1–2, p. 183–195, 2012.
- DE STEFANO, A.; JACOBSON, M. G. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 285–299, 2018.
- DENG, S. P.; TABATABAI, M. A. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylsulfatase. **Biology and Fertility of Soils**, v. 24, n. 2, p. 141–146, 1997.
- DIGNAC, MARIE-FRANCE DERRIEN, D. et al. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, 2017.
- DOLLINGER, J.; JOSE, S. Agroforestry for soil health. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 213–219, 2018.
- DULAZI, A. A. et al. Soil organic carbon and its labile pools as modulated by soil microbes under different land use practices in Typic Ustochrepts. **Tropical Ecology**, v. 64, n. 2, p. 276–286, 2022.
- DUVAL, M. E. et al. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: influence of management practices and edaphic conditions. **Catena**, v. 171, n. May 2017, p. 316–326,

2018.

- EDDY, W. C.; YANG, W. H. Improvements in soil health and soil carbon sequestration by an agroforestry for food production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 333, n. March, p. 107945, 2022.
- ERROUISSI, F. et al. Soil invertebrates in durum wheat (*Triticum durum* L.) cropping system under Mediterranean semi arid conditions: A comparison between conventional and no-tillage management. **Soil and Tillage Research**, v. 112, n. 2, p. 122–132, 2011.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. In: **Advances in Agronomy**. [s.l: s.n.]. v. 99p. 346–389.
- FERRARI NETO, J. et al. Soil carbon and nitrogen fractions and physical attributes affected by soil acidity amendments under no-till on Oxisol in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 24, 2021.
- FINE, A. K.; SCHINDELBECK, R. R. Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database. **Soil & Water Management & Conservation Statistics**, v. 81, p. 589–601, 2017.
- FLOR, I. C.; SANTOS, R. DOS; HARTE-MARQUES, B. Litterfall Production At Different Successional Stages in a Tropical Rain Forest in Southern Brazil. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 3, p. 494, 2017.
- FOLEY, J. A. et al. Amazonia revealed: Forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 1, p. 25–32, 2007.
- FORMAGLIO, G. et al. Mulching with pruned fronds promotes the internal soil N cycling and soil fertility in a large-scale oil palm plantation. **Biogeochemistry**, v. 154, n. 1, p. 63–80, 2021.
- FRAZÃO, L. A. et al. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **GCB Bioenergy**, 2013a.
- FRAZÃO, L. A. et al. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 4, p. 384–390, 2013b.
- FRAZÃO, L. A. et al. Soil carbon stocks under oil palm plantations in Bahia State, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 62, p. 1–7, 2014.
- FUTEMMA, C.; DE CASTRO, F.; BRONDIZIO, E. S. Farmers and Social Innovations in Rural Development: Collaborative Arrangements in Eastern Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 99, n. October 2019, 2020.
- GAMA-RODRIGUES, A. C. et al. An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, v. 118, n. 1–3, p. 453–469, 2014.
- GAMA-RODRIGUES, E. F. et al. Carbon storage in soil size fractions under Two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Environmental Management**, v. 45, n. 2, p. 274–283, 2010.
- GÉRARD, A. et al. Oil-palm yields in diversified plantations: Initial results from a biodiversity enrichment experiment in Sumatra, Indonesia. **Agriculture, Ecosystems and**

- Environment**, v. 240, p. 253–260, 2017.
- GMACH, M. R. et al. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, 2018.
- GOMES, M. F. et al. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. **Land Degradation and Development**, v. 32, n. 15, p. 4313–4326, 2021.
- GOMES, M. F. et al. Soil health indicators in oil palm agroforestry systems in the eastern. **Geoderma Regional**, v. 37, n. May, 2024.
- GOODRICK, I. et al. Soil carbon balance following conversion of grassland to oil palm. **GCB Bioenergy**, v. 7, p. 263–272, 2015.
- GOODRICK, I. et al. Tree-scale spatial variability of soil carbon cycling in a mature oil palm plantation. **Soil Research**, v. 54, n. 4, p. 397–406, 2016.
- GRUVER, J. Evaluating the sensitivity and linearity of a permanganate-oxidizable carbon method. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 4, p. 490–510, 2015.
- GU, C. et al. Dynamic changes of soil surface organic carbon under different mulching practices in citrus orchards on sloping land. **PLoS ONE**, v. 11, n. 12, p. 1–16, 2016.
- GUILLAUME, T. et al. Soil degradation in oil palm and rubber plantations under land resource scarcity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 232, p. 110–118, 2016.
- HANEY, R. L. et al. The soil health tool—Theory and initial broad-scale application. **Applied Soil Ecology**, v. 125, n. February, p. 162–168, 2018.
- HAYNES, R. J. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. **Advances in Agronomy**, 2005.
- HOK, L. et al. Enzymes and C pools as indicators of C build up in short-term conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia. **Soil and Tillage Research**, v. 177, n. May 2017, p. 125–133, 2018.
- HOMBEGOWDA, H. C. et al. On the rebound: Soil organic carbon stocks can bounce back to near forest levels when agroforests replace agriculture in southern India. **Soil**, v. 2, n. 1, p. 13–23, 2016.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/dende/br>>.
- IKOYI, I. et al. Responses of soil microbiota and nematodes to application of organic and inorganic fertilizers in grassland columns. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 5, p. 647–662, 2020.
- JAKOVAC, C. C. et al. Loss of secondary-forest resilience by land-use intensification in the Amazon. **Journal of Ecology**, v. 103, n. 1, p. 67–77, 2015.
- JENKINSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-IV. The decomposition of fumigated organisms in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, n. 3, p. 203–208, 1976.
- JONES, C. et al. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting

- models for the turnover of organic carbon in soil. **Global Change Biology**, v. 11, n. 1, p. 154–166, 2005.
- KARACA, A. et al. Soil Enzymes as Indication of Soil Quality. p. 119–148, 2010.
- KARLEN, D. L. et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4, 1997.
- KHANGURA, R. et al. Regenerative Agriculture—A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 3, p. 1–41, 2023.
- KHASANAH, N. et al. Oil Palm Agroforestry Can Achieve Economic and Environmental Gains as Indicated by Multifunctional Land Equivalent Ratios. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, n. January, p. 1–13, 2020.
- KOH, L. P.; LEVANG, P.; GHAZOUL, J. Designer landscapes for sustainable biofuels. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 24, n. 8, p. 431–438, 2009.
- KOTOWSKA, M. M. et al. Conversion of tropical lowland forest reduces nutrient return through litterfall, and alters nutrient use efficiency and seasonality of net primary production. **Oecologia**, v. 180, n. 2, p. 601–618, 2016.
- LAL, R. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, v. 5, n. 4, p. 212–222, 2016.
- LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020.
- LE BISSONNAIS, Y. et al. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agroecosystems: effect of plant roots and soil characteristics. **Plant and Soil**, v. 424, n. 1–2, p. 303–317, 2018.
- LENCI, L. H. V. et al. Carbon stock of tree biomass, litter and soil in rubber based agroforestry systems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 17, n. 3, 2022.
- LI, D.; NIU, S.; LUO, Y. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: A meta-analysis. **New Phytologist**, v. 195, n. 1, p. 172–181, 2012.
- LORI, M. et al. Organic management enhances soil quality and drives microbial community diversity in cocoa production systems. **Science of the Total Environment**, v. 834, n. March, 2022.
- LUAN, J. et al. Assessments of the impacts of Chinese fir plantation and natural regenerated forest on soil organic matter quality at Longmen mountain, Sichuan, China. **Geoderma**, v. 156, n. 3–4, p. 228–236, 2010.
- LUCAS, S.; WEIL, R. Can permanganate oxidizable carbon predict soil function responses to soil organic matter management? **Soil Science Society of America Journal**, n. January, p. 1768–1784, 2021.
- LUKE, S. H. et al. Managing Oil Palm Plantations More Sustainably: Large-Scale Experiments Within the Biodiversity and Ecosystem Function in Tropical Agriculture (BEFTA) Programme. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, n. January, p. 1–20, 2020.

- MAIA, S. M. F. et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007.
- MAIA, S. R. et al. Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. May, p. 731–740, 2021.
- MANORAMA, K. et al. Mulching and technological interventions avoid land degradation in an intensive oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) production system. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 13, p. 3785–3797, 15 ago. 2021.
- MARDEGAN, S. F. et al. Organic farming enhances soil carbon and nitrogen dynamics in oil palm crops from Southeast Amazon. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 68, n. 1, p. 104–113, 2022.
- MASURE, A. et al. Promoting oil palm-based agroforestry systems: an asset for the sustainability of the sector. **Cahiers Agricultures**, v. 32, 2023.
- MATOS, P. S. et al. Soil organic carbon fractions in agroforestry system in Brazil: seasonality and short-term dynamic assessment. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 47, n. Special Issue, p. 1–14, 2023.
- MATRICARDI, E. A. T. et al. Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 369, n. 6509, p. 1378–1382, 2020.
- MENDES, I. C. et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, n. March, p. 85–93, 2019.
- MENDES, I. C. **Tecnologia BioAS: Padrões de laudos e suas interpretações. Embrapa Cerrados**, 2020.
- MENDES, I. C. et al. Soil quality and grain yield: A win–win combination in clayey tropical oxisols. **Geoderma**, v. 388, n. June 2020, 2021.
- MENDES, I. D. C. et al. **Bioanálise De Solo: a Mais Nova Aliada Para a Sustentabilidade Agrícola**. Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia, , 2020.
- MENDES, L. W. et al. Land-use system shapes soil bacterial communities in Southeastern Amazon region. **Applied Soil Ecology**, v. 95, p. 151–160, 2015.
- MENDHAM, D. S. et al. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 7, p. 1067–1074, 2004.
- MERLOS, F. A. et al. Estimating lime requirements for tropical soils: Model comparison and development. **Geoderma**, v. 432, n. March, p. 0–2, 2023.
- MESQUITA, R. D. C. G. et al. Amazon rainforest succession: stochasticity or land-use legacy? **BioScience**, v. 65, n. 9, p. 849–861, 2015.
- MICCOLIS, A. et al. **Restauração ecológica com Sistemas Agroflorestais: Como conciliar conservação com produção**. Brasília: [s.n.].

- MICCOLIS, A.; VAN NOORDWIJK, M.; AMARAL, J. Oil palm in Brazil: lessons from policies and agroforestry innovation. In: **Tree commodities and resilient green economies in Africa**. Nairobi, Kenya: [s.n.].
- MOEBIUS-CLUNE, B. N. et al. **Comprehensive assessment of soil health - The Cornell framework manual**. [s.l: s.n.].
- MONROE, P. H. M. et al. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 221, p. 99–108, 2016.
- MONTEIRO DE CARVALHO, C. Palm oil expansion on degraded land for biodiesel production: A case study in Pará state, Brazil. **Biofuels**, v. 4, n. 5, p. 485–492, 2013.
- MUCHANE, M. N. et al. Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 295, n. February, p. 106899, 2020.
- NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 1, p. 10–23, 2009.
- NELSON, P. N. et al. Soil fertility changes following conversion of grassland to oil palm. **Soil Research**, v. 52, n. 7, p. 698–705, 2014.
- NELSON, P. N. et al. Soil sampling in oil palm plantations: a practical design that accounts for lateral variability at the tree scale. **Plant and Soil**, v. 394, n. 1–2, p. 421–429, 2015.
- NIELSEN, M. N.; WINDING, A. **Microorganisms as indicators of soil health**. [s.l: s.n.]. v. NERI Techn
- NIETHER, W. et al. Below- and aboveground production in cocoa monocultures and agroforestry systems. **Science of the Total Environment**, v. 657, p. 558–567, 2019.
- NOIROT, L. M. et al. Impacts of empty fruit bunch applications on soil organic carbon in an industrial oil palm plantation. **Journal of Environmental Management**, v. 317, n. October 2021, 2022.
- OECHAIYAPHUM, K. et al. Impact of long-term agricultural management practices on soil organic carbon and soil fertility of paddy fields in Northeastern Thailand. **Geoderma Regional**, v. 22, 2020.
- OLIVEIRA, R. L. L. et al. Management practices affect soil carbon and physical quality in oil palm agroforestry systems in the Amazon. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, n. 0123456789, 2022.
- ORTIZ, P. F. S. et al. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 11, n. September, p. 62–70, 2017.
- PACHÊCO, N. A.; BASTOS, T. X.; CREÃO, L. G. C. **Boletim Agrometeorológico de 2008 para Tomé-Açu, PA**. [s.l: s.n.].
- PANETTIERI, M. et al. Moldboard plowing effects on soil aggregation and soil organic matter quality assessed by ¹³C CPMAS NMR and biochemical analyses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 177, p. 48–57, 2013.
- PAUDEL, B. R. et al. Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and

- agroforestry buffer management. **Agroforestry Systems**, v. 84, n. 2, p. 311–323, 2012.
- PEDRINHO, A. et al. Forest-to-pasture conversion and recovery based on assessment of microbial communities in Eastern Amazon rainforest. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 95, n. 3, p. 1–10, 2019.
- PLAZA-BONILLA, D.; ÁLVARO-FUENTES, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 139, p. 19–22, 2014.
- PRAYOGO, C. et al. **Does different management and organic inputs in agroforestry system impact the changes on soil respiration and microbial biomass carbon?** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...**2021.
- PRIBYL, D. W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, v. 156, n. 3–4, p. 75–83, 2010.
- PUTZ, F. E.; REDFORD, K. H. The importance of defining “Forest”: Tropical forest degradation, deforestation, long-term phase shifts, and further transitions. **Biotropica**, v. 42, n. 1, p. 10–20, 2010.
- QUESADA, C. A. et al. Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. **Biogeosciences Discussions**, v. 6, n. 2, p. 3993–4057, 2009.
- QUESADA, C. A. et al. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, n. 6, p. 1415–1440, 2011.
- RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, n. October 2017, p. 122–137, 2018.
- RAHMAN, N. et al. Changes in soil organic carbon stocks after conversion from forest to oil palm plantations in Malaysian Borneo. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 10, 2018.
- RAHMAN, N. et al. The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. **Journal of Environmental Management**, v. 278, n. P2, p. 111446, 2021.
- RAMALHO FILHO, A. et al. **Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia.** [s.l.: s.n.]. v. 1
- RAMESH, T. et al. Assessment of soil organic carbon stocks and fractions under different agroforestry systems in subtropical hill agroecosystems of north-east India. **Agroforestry Systems**, v. 89, n. 4, p. 677–690, 2015.
- RAMOS, H. M. N. et al. Above- and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 221–237, 2018.
- RIAH, W. et al. Effects of pesticides on soil enzymes: A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 12, n. 2, p. 257–273, 2014.
- RODRIGUES, S. J. S. DE C. **Dinâmica de carbono em sistemas agrofloretais com palma de óleo na Amazônia oriental.** [s.l.] Universidade Federal Rural da Amazônia, 2019.

- RODRIGUES, T. E. et al. **Caracterização e Classificação dos Solos do Município de Tomé-Açu, PA**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001.
- ROMERO, C. M. et al. Patterns of change in permanganate oxidizable soil organic matter from semiarid drylands reflected by absorbance spectroscopy and Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. **Organic Geochemistry**, v. 120, p. 19–30, 2018.
- RÜEGG, J. et al. Drivers of soil carbon stabilization in oil palm plantations. **Land Degradation & Development**, n. May, p. 1–12, 2019.
- SÁ, J. C. DE M. et al. Soil carbon fractions and biological activity based indices can be used to study the impact of land management and ecological successions. **Ecological Indicators**, v. 84, n. January 2017, p. 96–105, 2018.
- SAHU, C.; MISHRA, R.; BASTI, S. Land-use change affects carbon storage and lability in tropical soil of India. **Geoderma Regional**, v. 32, n. August 2022, 2023.
- SAPUTRA, D. D. et al. Can cocoa agroforestry restore degraded soil structure following conversion from forest to agricultural use? **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 6, p. 2261–2276, 2020.
- SCHNEIDEWIND, U. et al. Carbon stocks, litterfall and pruning residues in monoculture and agroforestry cacao production systems. **Experimental Agriculture**, v. 55, n. 3, p. 452–470, 2019.
- SHI, L. et al. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. **Land Degradation & Development**, v. 29, p. 3886–3897, 2018.
- SHU, X. et al. Soil pH moderates the resistance and resilience of C and N cycling to transient and persistent stress. **Applied Soil Ecology**, v. 182, n. October 2022, p. 104690, 2023.
- SHUHADA, S. N. et al. Conversion of peat swamp forest to oil palm cultivation reduces the diversity and abundance of macrofungi. **Global Ecology and Conservation**, v. 23, p. e01122, 2020.
- SIEGWART, L. et al. Contribution of tree and crop roots to soil carbon stocks in a Sub-Saharan agroforestry parkland in Senegal. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 352, n. December 2022, 2023.
- SILVA, E. E. DA; AZEVEDO, P. H. S. DE; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2). **Comunicado Técnico EMBRAPA**, v. 99, p. 1–4, 2007.
- SILVER, W. L.; HALL, S. J.; GONZÁLEZ, G. Differential effects of canopy trimming and litter deposition on litterfall and nutrient dynamics in a wet subtropical forest. **Forest Ecology and Management**, v. 332, p. 47–55, 2014.
- SIQUEIRA, C. C. Z. et al. Carbon stocks of a degraded soil recovered with agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 9, 2019.
- SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155–176, 2002.
- SOMARRIBA, E. Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. **Agroforestry Systems**, v. 19, n. 3, p. 233–240, 1992.

- SOMMER, R.; DENICH, M.; VLEK, P. L. G. Carbon storage and root penetration in deep soils under small-farmer land-use systems in the Eastern Amazon region, Brazil. **Plant and Soil**, v. 219, p. 231–241, 2000.
- SOUZA, P. R. et al. Limiting Water Content for Compaction Induced by Mechanized Operations in the Soil with Oil Palm in the Eastern Amazon. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 4, p. 6167–6182, 2023.
- STEINFELD, J. P. et al. Increasing complexity of agroforestry systems benefits nutrient cycling and mineral-associated organic carbon storage, in south-eastern Brazil. **Geoderma**, v. 440, n. November, p. 116726, 2023.
- STOTT, D. E. Recommended Soil Health Indicators and Associated Laboratory Procedures. **Soil Health Technical Note No. 450-03**, n. 450, p. 76, 2019.
- STROSSER, E. Methods for determination of labile soil organic matter: An overview. **Journal of Agrobiology**, v. 27, n. 2, p. 49–60, 2010.
- SUÁREZ, L. R. et al. Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 314, n. January, 2021.
- TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: **Methods of Soil Analysis, Part 2: Microbiological and Biochemical Properties**. [s.l.: s.n.]. p. 291–328.
- TAO, H. H. et al. Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 256, n. December 2017, p. 105–113, 2018.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- TEUSCHER, M. et al. Experimental biodiversity enrichment in oil-palm-dominated landscapes in Indonesia. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. OCTOBER2016, p. 1–15, 2016.
- TISDALL, J. .; OADES, J. M. Organic Matter in Water-stable Aggregates. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141–163, 1982.
- TREEDIVNET. **EFForTS-BEE (Indonesia)**. Disponível em: <<https://treedivnet.ugent.be/ExpEFForTSBEE.html>>.
- TURMEL, M. S. et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis. **Agricultural Systems**, v. 134, p. 6–16, 2015.
- USDA. **Soil quality indicators**. **Natural Resources Conservation Service**, 2015a.
- USDA. **Chemical indicators and soil functions**. **USDA Fact Sheet**, 2015b. Disponível em: <http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_document/nrcs142p2_053256.pdf>
- USDA. Soil quality indicators : Biological indicators and soil functions. **USDA Natural Resources Conservation Service**, n. April, p. 1–4, 2015c.
- VERHULST, N. et al. Wheat yield and tillage-straw management system×year interaction explained by climatic co-variables for an irrigated bed planting system in northwestern Mexico. **Field Crops Research**, v. 124, n. 3, p. 347–356, 2011.
- WARTENBERG, A. C. et al. Soil fertility and Theobroma cacao growth and productivity under

- commonly intercropped shade-tree species in Sulawesi, Indonesia. **Plant and Soil**, v. 453, n. 1–2, p. 87–104, 2020.
- WEIL, R. R. et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 18, n. 1, p. 3–17, 2003.
- WOODINGS, F. S.; MARGENOT, A. J. Revisiting the permanganate oxidizable carbon (POXC) assay assumptions: POXC is lignin sensitive. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 8, n. 1, p. 2–7, 2023.
- XIAO, L. et al. Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau. **Ecological Engineering**, v. 143, n. 5, p. 105671, 2020.
- ZHANG, S. et al. Soil carbon fractions of restored lands in Liusha River Valley, Sichuan. **Ecological Engineering**, v. 40, p. 27–36, 2012.
- ZUUR, A. F. et al. **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York, NY: Springer New York, 2009.

4 SENSIBILIDADE DO CARBONO OXIDÁVEL POR PERMANGANATO PARA DETECTAR MUDANÇAS DE CURTO PRAZO NA SAÚDE DO SOLO EM SISTEMA AGROFLORESTAL E MONOCULTIVO DE PALMA DE ÓLEO

Artigo submetido para o número especial Crop Diversification and Soil Health da Revista Land Degradation and Development

RESUMO

Sistemas agroflorestais (SAFs) e monocultivos de palma de óleo têm sido utilizados para recuperação da saúde do solo de áreas degradadas na Amazônia. Uma melhor compreensão sobre o tempo de recuperação da saúde do solo é necessária para aperfeiçoar as práticas de recuperação de áreas degradadas. Nosso objetivo foi avaliar as alterações de curto prazo dos teores de carbono oxidável por permanganato (CPOX) e carbono orgânico total do solo (COS) em SAFs com palma de óleo, monocultivos desta cultura e uma floresta secundária na Amazônia oriental. Usamos a floresta secundária como referência de recuperação em condições naturais. Em 2018 e 2022, coletamos amostras de solo nas seguintes zonas de manejo dentro dos sistemas de produção de palma de óleo: caminho da colheita (HAR), coroamento da palma de óleo (ACP), empilhamento (PIL) e faixa diversificada (DIV). O CPOX, nos SAFs, aumentou 32% e, no monocultivo, reduziu 21% entre 2018 e 2022. Nas zonas de manejo dos SAFs, o CPOX aumentou 31% em HAR, 28% em ACP, 40% na PIL e 42% em DIV. No monocultivo, houve um declínio de 31% em CARE 18% em ACP. Sugerimos que a diversidade de fontes de matéria orgânica (adubação orgânica, litterfall, variados sistemas radiculares e poda das diversas espécies) possivelmente favorece o incremento de carbono nos SAFs por meio da ciclagem desse material. Em comparação, o monocultivo apresenta menor diversidade de fontes de aporte de matéria orgânica (sistema radicular da palma de óleo e empilhamento das folhas de palma de óleo). Concluímos que SAFs (e as zonas de manejo nos SAFs) com palma de óleo são capazes de melhorar a saúde do solo a curto prazo. O nosso estudo mostra que é possível utilizar o CPOX para monitorar a saúde do solo a curto prazo em sistemas de produção de palma de óleo na Amazônia. Além disso, ressalta a

necessidade do acompanhamento contínuo do status da saúde do solo para orientar práticas de manejo com menor impacto ambiental.

Palavras-chave: Amazonia; soil health; soil quality; soil organic matter; management zone

4.1 Introdução

A saúde do solo é definida como “a capacidade do solo funcionar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal” (Karlen *et al.*, 1997). A saúde do solo é geralmente dividida em química, física e biológica (USDA, 2015a); a saúde física compreende, de modo geral, a estrutura do solo e a drenagem de água; a saúde biológica está relacionada, principalmente, à ciclagem de nutrientes por meio dos organismos do solo; e a saúde química está associada ao armazenamento e à disponibilidade de nutrientes para plantas e organismos do solo (USDA, 2015b, 2015c). O monitoramento da saúde do solo em cultivos agrícolas envolve principalmente medições de saúde química (Bünemann *et al.*, 2018), enquanto que o monitoramento das saúdes biológica e física são negligenciadas. Para obter um panorama completo da saúde do solo, esforços no cenário mundial estão voltados para a identificação de indicadores capazes de auxiliar no monitoramento e na previsão da saúde física, química e biológica do solo (Fine & Schindelbeck, 2017; Mendes *et al.*, 2019; Moebius-Clune *et al.*, 2016).

O carbono orgânico do solo (COS) é frequentemente utilizado como indicador de melhoria da saúde do solo ou do nível de degradação de cultivos agrícolas (Bünemann *et al.*, 2018). O COS controla grande parte dos processos do solo, que incluem ciclagem de nutrientes e estruturação do solo (Rabot *et al.*, 2018; Tisdall & Oades, 1982). Contudo, não há consenso sobre quão rápido podem-se detectar mudanças nos estoques e teores de carbono do solo em função do manejo e do uso do solo (Carron *et al.*, 2015; Castro Lopes *et al.*, 2018; Gu *et al.*, 2016). Essa falta de consenso reduz (ou inibe) o interesse pelo monitoramento a curto prazo do C do solo. Uma melhor compreensão sobre mudanças de curto prazo no C do solo pode contribuir para antecipar tomadas de decisão de manejo de cultivos agrícolas (Chatterjee *et al.*, 2018; Culman *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2012). Nesse contexto, o CPOX emerge como um

indicador eficiente para identificar mudanças de curto prazo na saúde do solo, pois é sensível aos efeitos de alterações de manejo, sistemas de cobertura do solo e clima, além de ser de fácil execução (em laboratório e em campo) e de baixo custo.

Na região Amazônica, a produtividade da vegetação nativa ou de cultivos agrícolas sustentáveis depende da ciclagem de carbono (e nutrientes), pois os solos dessa região são naturalmente ácidos e pobres em nutrientes. Logo, sistemas com alto aporte de matéria orgânica são recomendados para a manutenção da saúde do solo na Amazônia; por exemplo, SAFs geralmente aportam maiores quantidades de C ao solo do que monocultivos (Saputra *et al.*, 2020; Schneidewind *et al.*, 2019). Com objetivo de associar o interesse econômico pela palma de óleo com os benefícios ambientais ligados aos SAFs (por exemplo, armazenamento de carbono, melhoria da saúde do solo e conservação da biodiversidade), sistemas agroflorestais com palma de óleo têm sido implantados e estudados na região como alternativa produtiva ao monocultivo da cultura.

Estudos sobre monitoramento da saúde do solo (baseado no CPOX) a curto prazo em sistemas agroflorestais e monocultivos de palma de óleo são escassos. Que seja de nosso conhecimento, apenas três estudos sobre CPOX em palma de óleo foram publicados: 1) Bruun *et al.* (2013) avaliaram o efeito da conversão de sistemas de cultivo itinerante para o cultivo de palma de óleo sobre o CPOX e o COS; 2) Noirot *et al.* (2022) investigaram a variabilidade espacial do CPOX e do COS em função da aplicação de cachos de fruto vazios em plantios de palma de óleo; 3) Gomes *et al.* (2021) mediram o efeito dos sistemas de cobertura do solo (SAF com palma de óleo, monocultivo de palma de óleo e floresta) e das zonas de manejo dos sistemas de produção de palma de óleo sobre o CPOX e o COS. Dessas pesquisas somente o trabalho de Bruun *et al.* (2013) realizou avaliação temporal e de curto prazo do CPOX.

Portanto, nosso objetivo principal foi avaliar as mudanças de curto prazo no CPOX e COS em função de sistemas de cobertura do solo (monocultivo x SAF x floresta) e das zonas de manejo de sistemas de cultivo de palma de óleo (caminho da colheita - CARx coroamento da palma de óleo – ACP x empilhamento das folhas podadas de palma de óleo - PIL x faixa com espécies frutíferas e de madeira - DIV). Consideramos neste estudo diferentes zonas de manejo porque recebem diferentes níveis de aporte de matéria orgânica devido ao manejo específico em cada uma delas, o que causa uma reconhecida variação espacial da saúde do solo, incluindo o COS (Gomes *et al.*, 2021; Noirot *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022; Rüegg *et al.*, 2019).

Nossa primeira hipótese é que o incremento nas médias de CPOX e COS será positivo nos três sistemas, superior nos SAFs com palma de óleo, intermediário na floresta e inferior no monocultivo. Nossa hipótese secundária é que as zonas com maior adição de matéria orgânica apresentarão maior incremento nas médias de CPOX e COS, ou seja, o padrão de incremento será empilhamento > coroamento da palma > caminho da colheita.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em fazendas no município de Tomé-Açu, estado do Pará, Amazônia Oriental (Figura 15). Nas fazendas 1 (02°24'17" S, 48°14'37" W), 2 (02°20'54" S, 48°15'44" W) e 3 (02°40'42" S, 48°20'45" W) estudamos dois sítios de sistemas agroflorestais com palma de óleo e um fragmento de floresta secundária. Em função da ausência de florestas maduras próximo das áreas de estudo, selecionamos fragmentos de florestas secundárias mais íntegros possíveis como sistema de referência para comparação com os sistemas agroflorestais. Reconhecemos que a capacidade do restabelecimento da ciclagem de carbono e nutrientes depende não apenas da idade da floresta secundária, mas também de outros fatores, como intensidade e tipo de uso prévio da área abandonada (Jakovac *et al.*, 2015; Mesquita *et al.*, 2015). Nas fazendas 4 (02°20'18" S, 48°15'55" W) e 5 (02°31'40" S, 48°24'57" W) avaliamos sítios de monocultivos de palma de óleo.

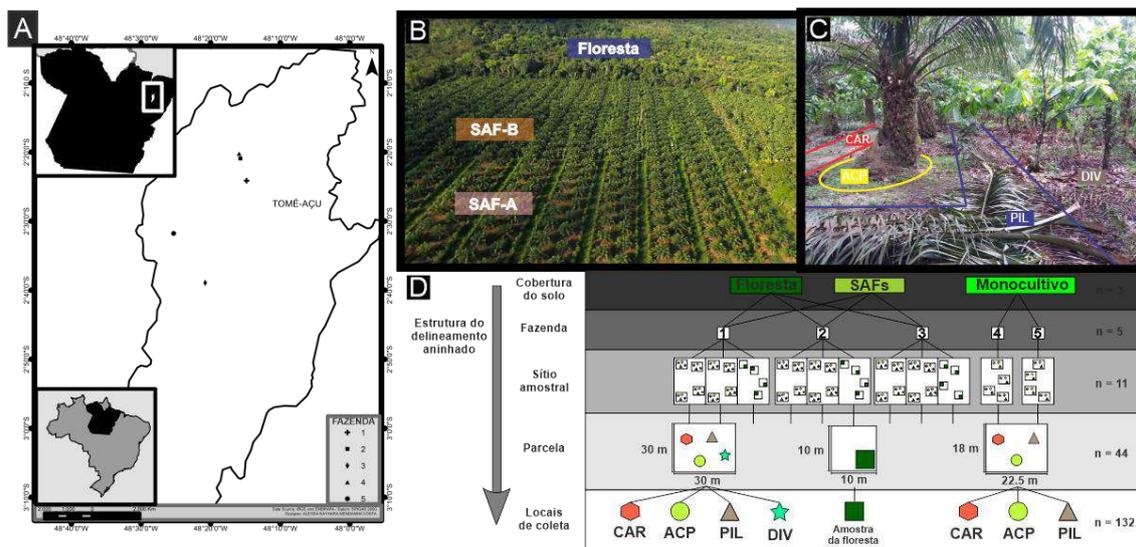


Figura 15 Mapa de localização das fazendas em Tomé-Açu (A), vista aérea da Fazenda 2 (B), locais de coleta nos sistemas agroflorestais com palma de óleo (C) e ilustração esquemática dos locais de coleta do delineamento aninhado (D).

O clima da região é classificado como Am (tropical quente e úmido) segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013); o mês mais chuvoso é março e o menos chuvoso é setembro; a precipitação anual média é 2300 mm e a temperatura média anual é 26.8°C (Pachêco *et al.*, 2009). A vegetação original da região era floresta ombrófila densa e, atualmente, a região é coberta por um mosaico de vegetações (Almeida *et al.*, 2020; Matricardi *et al.*, 2020). Os solos da região são predominantemente da classe Latossolo Amarelo (Oxisols according to the USDA classification, Soil Survey Staff, 2014) (Rodrigues *et al.*, 2001).

Detalhes sobre as fazendas, sistemas agroflorestais e (fragmentos de) florestas secundárias (de agora em diante chamados de sistemas de cobertura do solo) são apresentados na Tabela 10. Nas fazendas 1, 2 e 3, inicialmente foram plantados dois tipos de SAF com palma de óleo que diferiam em diversidade de espécies: SAFs simples (SAFs-A), contendo *G. sepium* e *I. edulis*, e os SAFs diversos (SAFs-B), contendo várias espécies plantadas (Tabela 11) e predomínio de *T. cacao*. Ao longo do tempo, os SAFs-A das fazendas 1 e 3 tornaram-se diversos porque os agricultores plantaram novas espécies neles. A composição de espécies dos SAFs na época deste estudo está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 Histórico de uso das fazendas, técnica de preparo da área para plantio dos sistemas de cultivo de palma de óleo e área de referência.

Fazenda	Sistema de cultivo de palma de óleo			Área de referência	
	Tipo	Idade em 2022	Uso prévio da terra		Preparo do solo
1	Sistema agroflorestal	16	Pomar abandonado (10 anos)	Corte-e-trituração	Floresta em regeneração por 36 anos
2	Sistema agroflorestal	16	Floresta (10 anos)	Corte-e-trituração	Floresta em regeneração por 26 anos
3	Sistema agroflorestal	16	Pastagem degradada (25 anos)	Gradagem	Floresta em regeneração por 46 anos
4	Monocultivo	18	Floresta em regeneração (13 anos) após cultivo com uso de fogo	Corte-e-queima	
5	Monocultivo	15	Pastagem degradada	Queima	

Todos os SAFs eram formados por linhas duplas de palma de óleo intercaladas por faixas de plantio das outras espécies (faixa diversificada). Nas linhas duplas de palma de óleo foram plantadas mudas de aproximadamente 15 meses de idade e 2 m de altura, dispostas em formato de triângulo equilátero (9.0 x 9.0 x 9.0 m). As faixas diversificadas tinham 15 m de largura, exceto a do SAF-B da fazenda 1, que tinha 21 m; nas faixas diversificadas a distância entre plantas de *T. cacao* era 3 m; nas linhas de *T. cacao* foram plantadas espécies frutíferas e florestais a cada 5 m. A adubação no plantio e de manutenção é apresentada na Tabela 13.

Tabela 12 Espécies vegetais consorciadas com a palma de óleo em sistemas agroflorestais em três fazendas em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Espécie	Família	Fazenda 1		Fazenda 2		Fazenda 3	
		SAF -A	SAF -B	SAF -A	SAF -B	SAF -A	SAF-B
<i>Acacia mangium</i> Willd.	Fabaceae				x	x	x
<i>Adenantha pavonina</i> L.	Fabaceae		¹ x		x	x	
<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	Moraceae					x	
<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	Meliaceae		x				
<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Lecythidaceae		x			x	
<i>Bixa orellana</i> L.	Bixaceae					x	x
<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	Calophyllaceae				x		
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Meliaceae	x	x		x	x	
<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	Arecaceae	x	x	x	x	x	x
<i>Euterpe oleracea</i> Mart.	Arecaceae		x		x		
<i>Gliricidia sepium</i> Jacq.	Fabaceae	x		x		x	x
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Fabaceae		x				
<i>Inga edulis</i> Mart.	Fabaceae	x	x	x		x	x
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D.Don	Bignoniaceae				x		
<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Lecythidaceae					x	
<i>Mangifera indica</i> L.	Anacardiaceae		x		x	x	
<i>Oenocarpus mapora</i> H. Karsten	Arecaceae		x		x		
<i>Piper nigrum</i> L.	Piperaceae						-
<i>Platonia insignis</i> Mart.	Cluciaceae						x
<i>Sclerobium paniculatum</i> Vogel	Fabaceae				x		
<i>Spondias lutea</i> L.	Anacardiaceae				x	x	x
<i>Swietenia macrophylla</i> King	Meliaceae						x
<i>Tabebuia</i> sp.	Bignoniaceae	x	x		x		
<i>Theobroma cacao</i> L.	Malvaceae	x	x		x	x	x

<i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Spreng)	Malvaceae		x	x	x
<i>Virola surinamensis</i> (Rol. ex Rottb.) Warb.	Myristicaceae	x			

¹x representa a presença da espécie no sistema agroflorestal

Tabela 13 Histórico de aplicação de fertilizantes e calcário em sistemas agroflorestais baseados em palmeira de óleo em Tomé-Açu, na Amazônia oriental, Brasil.

Calcário / fertilizante	Unidade	Área de coroamento da palmeira de óleo													Faixa diversificada					
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2008	2016	2017	2018	2019	2020
Calcário dolomítico ^d	kg ha ⁻¹														1300 ^b			2067 ^a		
Fosfato natural de ARAD ^e	kg planta ⁻¹	0.3		1	1.5						0.7	2.5	3.0		0.3 ^a	0.2 ^a	0.7 ^a	2.5 ^a	0.9 ^a	
Moinha de carvão ^f	kg planta ⁻¹	10													10 ^b					
Cama de frango ^g	kg planta ⁻¹														10 ^b					
Farinha de ossos ^h	kg planta ⁻¹		1	0.5	0.5															
Torta de mamona ⁱ	kg planta ⁻¹		2	2	4															
Torta de dendê ^j	kg planta ⁻¹								30	30	40				1.0 ^a	1.0 ^a	5.5 ^a	2.5 ^a		
FTE BR12 ^k	kg planta ⁻¹			0.3	0.2															
Cachos vazios de palmeira de óleo ^l	kg planta ⁻¹			100	221	150	200	240	240					150						
Bórax ^m	kg planta ⁻¹	10		0.1																
Composto orgânico ⁿ	kg planta ⁻¹		40												40 ^b					
Yoorin ^o	kg planta ⁻¹								1.5											
Produbor 10 ^p	kg planta ⁻¹									0.1	0.15	0.15			0.1 ^c		0.10 ^a	0.15 ^a	0.10 ^a	
Polissulfato de potássio ^q	kg planta ⁻¹										2.6	9				0.10 ^a	1.28 ^a	0.7 ^a		
Sulfato de potássio ^r	kg planta ⁻¹	40					0.8	0.8	0.4	1.8				2.0			0.1 ^a	0.45 ^a	0.5 ^a	

^a *Theobroma cacao* e *Euterpe oleracea* (Fazendas 1 e 2);
Theobroma cacao (Fazenda 3)
^b Fertilizante aplicado em toda faixa
^c *Euterpe oleracea* (Fazendas 1 e 2)
^d Mg: 12%; Ca: 38%
^e P: 10%; Ca: 37%
^f K: 5.9%; Mg: 2.8%; Ca: 15.40%
^g N: 2.58%; P: 2.27%; K: 2.31%; Mg: 0.44%; Ca: 30%
^h N: 2%; P: 20%; K: 0.12%; Mg: 0.24%; Ca: 30%
ⁱ N: 5.44%; P: 1.91%; K: 1.54%; Mg: 0.5%; Ca: 1.8%
^j N: 2.4%; P: 0.56%; K: 0.61%; Mg: 0.01%; Ca: 4%; S: 0.4%; Zn:
0.01%; B: 0.05%

Fonte: Alessa Mendanha

^k B: 1.8 %; Cu: 0.85%; Mn: 2.0%; Zn: 9.0%; S: 3.9%
^l N: 0.33%; P: 0.04%; K: 0.55%; Mg: 0.09%; Ca:0.28 %; S:
0.04%
^m B: 20.8%; B₂O₃: 67%
ⁿ N: 0.80%; P: 0.40%; K: 0.30%; Mg: 0.10%; Ca: 0.23%; S:
0.03%
^o P: 16%; Mg: 7%; Ca: 18%; S: 6%; Zn: 0.55%; B: 0.1%
^p B: 10%
^q K: 14.0%; Mg: 3.5%; Ca: 12%; S: 19%
^r K: 50%; S: 18%

4.2.2 Desenho Experimental

Em 2018, estabelecemos aleatoriamente quatro parcelas em cada sistema de cobertura do solo. Nos SAFs, as parcelas mediam 30 x 30 m e compreendiam uma linha dupla de palma de óleo (que continham as zonas coroamento, caminho da colheita e empilhamentos) e duas faixas diversificadas (Tabela 14). Nos monocultivos, as parcelas mediam 30 x 30 m e compreendiam duas linhas duplas de palma de óleo. Nas florestas, as parcelas mediam 10 x 10 m e não tinham zonas definidas. Em 2018 e 2022, coletamos cinco amostras de solo simples para formar uma amostra composta na profundidade 0-10 cm com trado de aço em cada zona de manejo nos SAFs e monocultivo e de maneira aleatória dentro das parcelas da floresta. Coletamos amostras de solo somente nas florestas secundárias das fazendas 1 e 2, em 2018.

Tabela 14 Área relativa ocupada por cada zona de manejo nos sistemas de produção de palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil.

Fazenda	Sistema de produção	Área relativa ocupada por cada zona de manejo (%)			
		CAR	ACP	PIL	DIV
1	SAF-B	14.52	19.32	12.96	53.2
	SAF-A	20.84	29.51	19.8	29.85
2	SAF-B	18.92	21.79	12.54	46.75
	SAF-A	24.69	25.74	11.22	38.35
3	SAF-B	20.07	18.24	24.64	37.5
	SAF-A	20.5	21.57	20.5	37.2
4 e 5	Monocultivo	45.74	32.58	21.7	-

4.2.3 Análises de solo

Determinamos o carbono oxidável por permanganato (CPOX) segundo (Weil *et al.*, 2003). Submetemos 2.5 g de solo seco (2 mm) à oxidação por permanganato de potássio a 0,003 mol L⁻¹ e realizamos a leitura a 550 nm em espectrofotômetro (BioSpectro). O carbono orgânico do solo (COS) foi quantificado por combustão via seca em analisador elementar (Vario MACRO Cube) usando-se amostras de solo peneirado a 100 mesh.

4.2.4 Análise estatística

Usamos modelo linear misto (*nlme* pacote) para testar a evolução temporal dos indicadores de saúde do solo nos sistemas de cobertura do solo e nas zonas de manejo dos sistemas de produção de palma de óleo. Os modelos lineares mistos são mais adequados e robustos para modelos hierárquicos como o nosso design amostral (Zuur *et al.*, 2009). Como efeitos fixos, nossas variáveis respostas foram: CPOX e COS em função dos anos de coleta ou do incremento nos níveis dessas variáveis entre os sistemas de cobertura do solo e zonas de manejo. Os fatores aleatórios foram as variáveis: fazendas (g1), os sítios dentro das fazendas (g2) e a dependência temporal (g3). Testamos a estrutura dos efeitos aleatórios para avaliar a permanência (1) do aninhamento (g1/g2) nos SAFs, (2) das fazendas no monocultivo e na floresta, e (3) da dependência temporal nos três sistemas de cobertura do solo. A dependência temporal só foi significativa e, portanto, mantida no modelo para comparação entre anos para a variável COS na comparação no SAFs. Utilizamos a função *lme* do pacote *lme4* para construir os modelos lineares mistos (Bates *et al.*, 2015) e a função *Anova* do pacote *car* para executar o teste de significância Tipo II Wald Qui-quadrado. Avaliamos as associações entre as variáveis pela correlação de Pearson. Para determinar a média da parcela, consideramos a área relativa (%) ocupada por cada zona de manejo (Tabela 14). Todas as análises estatísticas foram executadas com o Software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022).

4.3 Resultados

4.3.1 Evolução de CPOX e COS nos sistemas de cobertura do solo

CPOX variou temporalmente no SAF, na floresta e no monocultivo (Figura 16A, Tabela 15). Após quatro anos, o CPOX diminuiu 21% no monocultivo (2018: $527 \pm 10 \text{ mg kg}^{-1}$; 2022: $0.412 \pm 31 \text{ mg kg}^{-1}$), aumentou 36% no SAF (2018: $541 \pm 7 \text{ mg kg}^{-1}$; 2022: $0.736 \pm 19 \text{ mg kg}^{-1}$) e 32% na floresta (2018: $490 \pm 61 \text{ mg kg}^{-1}$; 2022: $650 \pm 29 \text{ mg kg}^{-1}$) (Figura 16A). Nos SAFs e na floresta, o incremento de CPOX foi de 191 ± 29 e $160 \pm 40 \text{ g kg}^{-1} \text{ year}^{-1}$, respectivamente, enquanto no monocultivo houve declínio de $-114 \pm 30 \text{ g kg}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Figura 17A, Tabela 16).

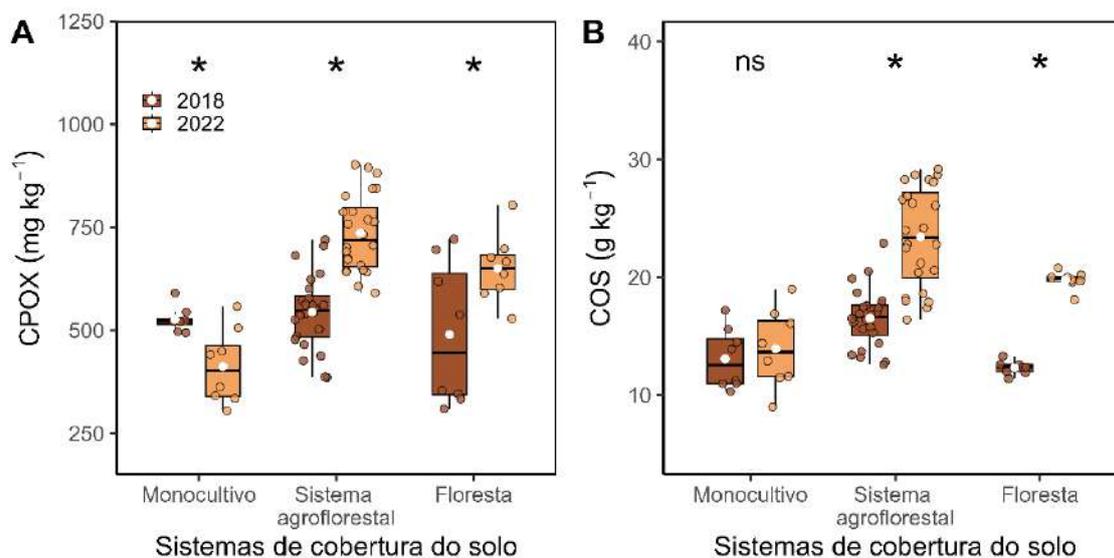


Figura 16 Carbono oxidável por permanganato (CPOX) e B – carbono orgânico do solo (COS) em dois anos de coleta em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental, Brasil. “*” Indica efeito significativo e “ns” indica efeito não significativo entre os anos de coleta em cada sistema de cobertura do solo baseado no modelo linear misto.

COS aumentou 41% no SAF (2018: $16.60 \pm 0.48 \text{ g kg}^{-1}$; 2022: $23.42 \pm 0.87 \text{ g kg}^{-1}$) e 60% na floresta (2018: $12.32 \pm 0.20 \text{ g kg}^{-1}$; 2022: $19.78 \pm 0.27 \text{ g kg}^{-1}$), porém não variou no monocultivo (Figura 16B, Tabela 15). O incremento de COS nos SAFs e na floresta foi 1.72 ± 0.23 e $1.86 \pm 0.01 \text{ g kg}^{-1} \text{ year}^{-1}$, respectivamente; no monocultivo o incremento foi $0.04 \pm 0.12 \text{ g kg}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Figura 17B, Tabela 16).

Tabela 15 Tabela de análise de deviance (testes do Tipo II) do carbono oxidável por permanganato (CPOX) e carbono orgânico do solo (COS) entre dois anos de coleta em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental.

Sistema de cobertura do solo	Resposta	Efeito fixo		Efeito aleatório			gl
		Qui-q	Pr(>Qui-q)	g1	g2	g3	
Monocultivo	CPOX	13.701	<0.001	2	-	-	1
	COS	0.511	0.4745	2	-	-	1
Sistema agroflorestal	CPOX	20.889	<0.001	3	12	-	1
	COS	7.363	0.007	3	12	24	1
Floresta	CPOX	18.094	<0.001	2	-	-	1
	COS	483.38	<0.001	2	-	-	1

Nota: Efeito aleatório: $\sim 1|g1/g2$, onde a intercepto varia entre g1 e g2 dentro de g1; $\sim 1/g3$, onde o intercepto varia dentro de g3. Os dados relacionados a esta análise estão apresentados na Figura 16.

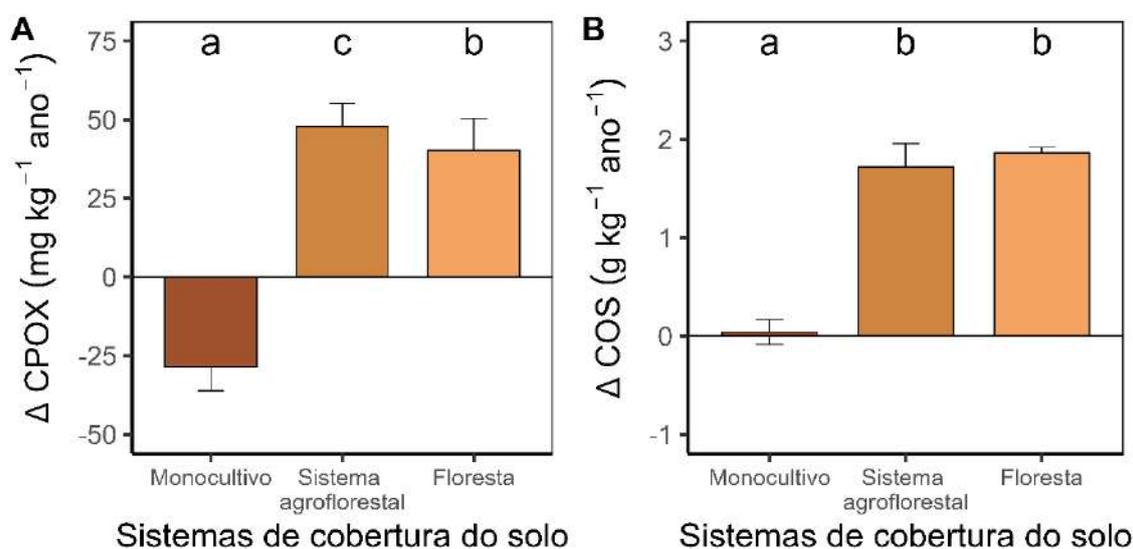


Figura 17 Incremento em carbono oxidável por permanganato (CPOX) (A) e carbono orgânico do solo (COS) (B) em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental, Brasil. Letras diferentes indicam efeito significativo entre os sistemas de cobertura do solo baseado no modelo linear misto.

Tabela 16 Tabela de análise de deviance (teste do Tipo II) do incremento em carbono oxidável por permanganato (CPOX) e em carbono orgânico do solo (COS) em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental.

Efeito fixo			Efeito aleatório		
	Qui-q	Pr(>Qui-q)	g1	g2	gl
CPOX	12.238	0.002	5	11	2
COS	6.066	0.048	5	11	2

Nota: Efeito aleatório: $\sim 1|g1/g2$, onde a intercepto varia entre g1 e g2 dentro de g1. Os dados relacionados a esta análise estão apresentados na Figura 17.

4.3.2 Evolução de CPOX e COS nas zonas de manejo dos sistemas de cultivo de palma de óleo

CPOX variou temporalmente em todas as zonas de manejo dos SAFs (Figura 18A, Tabela 17); em HAR: de 78 ± 22 em 2018 a 628 ± 18 mg kg⁻¹ em 2022; em ACP: de 562 ± 24 a 720 ± 18 mg kg⁻¹; em PIL: de 604 ± 28 a 850 ± 37 mg kg⁻¹; e em DIV: de 552 ± 20 a 786 ± 25 mg kg⁻¹. Esses valores representam um aumento de 31% em HAR, 28% no ACP, 40% na PIL e 42% em DIV. No monocultivo, o CPOX declinou 31% no CAR(2018: 488 ± 10 e 2022: 336 ± 32 mg kg⁻¹) e 18% no ACP (2018: 515 ± 15 e 2022: 419 ± 36 mg kg⁻¹); no empilhamento não houve mudança no teor de CPOX (Figura 18B, Tabela 17).

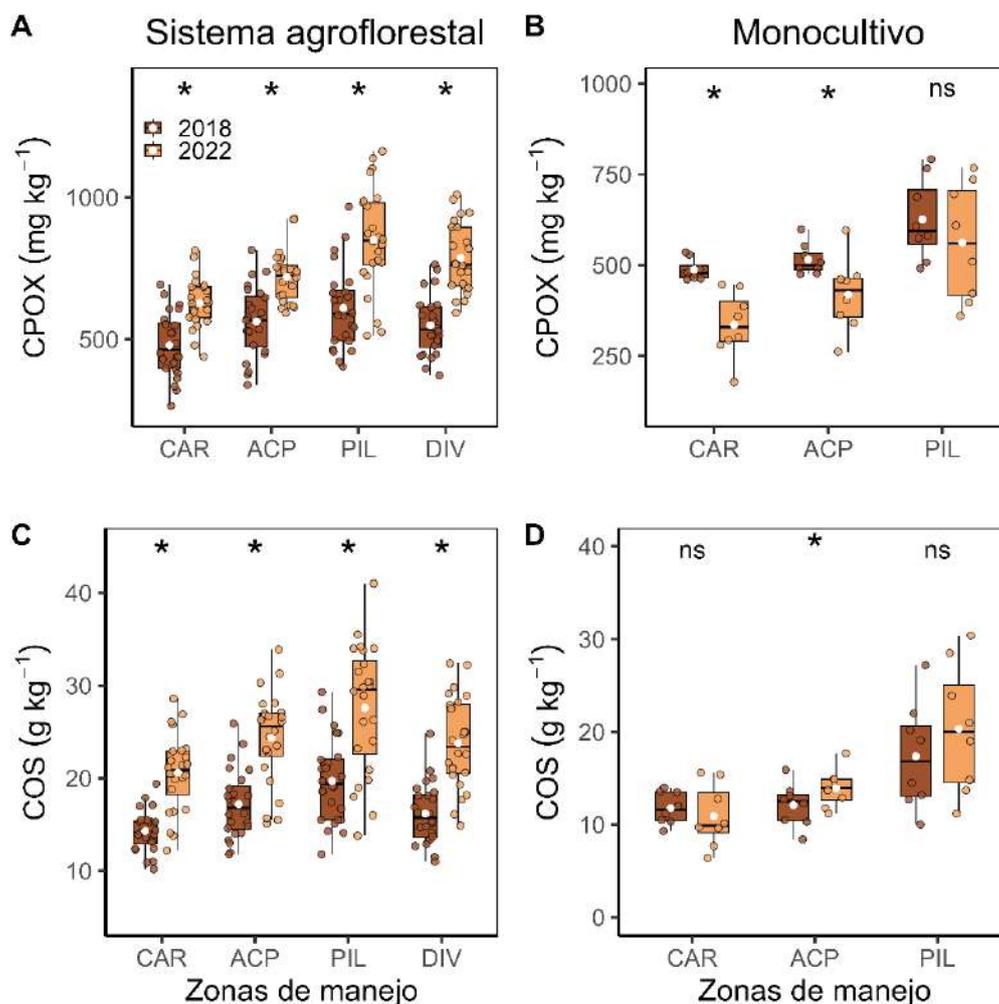


Figura 18 Carbono oxidável por permanganato (CPOX) em zonas de manejo de sistemas agroflorestais com palma de óleo (A) e monocultivos de palma de óleo (B) e carbono orgânico total (COS) em zonas de manejo de sistemas agroflorestais com palma de óleo (C) e monocultivos de palma de óleo (D) em dois anos de coleta na Amazônia oriental, Brasil. “*” indica efeito significativo e “ns” indica efeito não significativo entre anos de coleta em cada sistema de cultivo de palma de óleo baseado no modelo linear misto.

Nos SAFs, COS aumentou 43% em CAR (2018: 14.35 ± 0.44 e 2022: 20.60 ± 0.85 g kg⁻¹), 40 % em ACP (2018: 17.39 ± 0.71 e 2022: 24.36 ± 1.01 g kg⁻¹), 40% em PIL (2018: 19.53 ± 0.89 e 2022: 27.59 ± 1.41 g kg⁻¹) e 45% em DIV (2018: 16.35 ± 0.63 e 2022: 23.80 ± 1.00 g kg⁻¹) (Figura 18C, Tabela 17). No monocultivo, COS aumentou 15% em ACP (2018: 12.1 ± 0.81 e 2022: 13.91 ± 0.72 g kg⁻¹). PIL e CAR no monocultivo não apresentaram variação temporal de COS (Figura 18D, Tabela 17).

Tabela 17 Tabela de análise de deviance (testes do Tipo II) do carbono oxidável por permanganato (CPOX) e carbono orgânico do solo (COS) entre dois anos de coleta nas zonas de manejo em sistemas agroflorestais e monocultivos com palma de óleo na Amazônia oriental.

Fixed effect	CAR		ACP		PIL		DIV		Efeito aleatório		gl
	Qui-q	Pr(> Qui-q)	g1	g2							
Sistema agroflorestal											
CPOX	7.794	<0.001	32.271	<0.001	44.699	<0.001	71.065	<0.001	3	6	1
COS	58.146	<0.001	49.65	<0.001	36.09	<0.001	78.872	<0.001	3	6	1
Monocultivo											
CPOX	21.827	<0.001	6.315	0.011	0.927	0.336	-	-	2	-	1
COS	0.684	0.408	4.178	0.04	1.026	0.310	-	-	2	-	1

Nota: Efeito aleatório: $\sim 1|g1/g2$, onde a intercepto varia entre g1 e g2 dentro de g1. Os dados relacionados a esta análise estão apresentados na Figura 18.

Os incrementos de CPOX (Figura 19A e B) e COS (Figura 19C e D) não variaram entre as zonas de manejo dentro dos sistemas (Tabela 18).

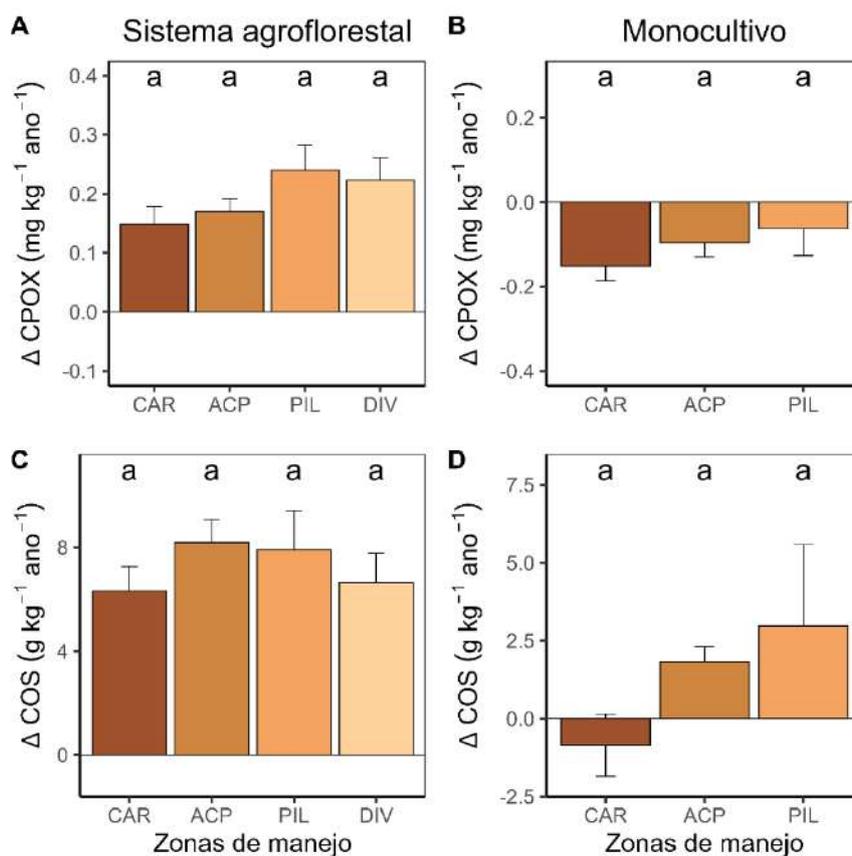


Figura 19 Incremento no carbono oxidável por permanganato (CPOX) em zonas de manejo dos sistemas agroflorestais com palma de óleo (A) e monocultivos de palma de óleo (B) e incremento no carbono orgânico do solo (COS) em zonas de manejo dos sistemas agroflorestais com palma de óleo (C) e monocultivos de palma de óleo (D) na Amazônia oriental, Brasil. Letras diferentes indicam efeito

significativo entre os incrementos nas zonas de manejo do sistemas de cultivo de palma de óleo baseado no modelo linear misto.

Tabela 18 Os incrementos de CPOX (Figura 5A e B) e COS (Figura 5C e D) não variaram entre as zonas de manejo dentro dos sistemas.

Sistemas de cultivo de palma de óleo	Efeito fixo			Efeito aleatório		gl
	Resposta	Qui-q	Pr(>Qui-q)	g1	g2	
Monocultivo	CPOX	1.8782	0.391	2	-	2
	COS	3.0102	0.222	2	-	2
Sistema agroflorestal	CPOX	5.0639	0.1672	3	6	3
	COS	2.582	0.4606	3	6	3

Nota: Efeito aleatório: $\sim 1|g1/g2$, onde a intercepto varia entre g1 e g2 dentro de g1. Os dados relacionados a esta análise estão apresentados na Figura 19.

4.3.3 Correlação

Houve correlação positiva e significativa entre COS e CPOX ($r = 0.86$, $p < 0.001$) (Figura 20).

4.4 Discussão

4.4.1 Cobertura do solo

Em geral, a regeneração natural de áreas na Amazônia resulta em florestas secundárias (Putz & Redford, 2010). Neste estudo, consideramos a floresta secundária como o sistema de referência de como o C do solo evoluiria em condição natural após o abandono da área cultivada. Desse modo, assumimos que incrementos de C iguais ou superiores aos da floresta (secundária) podem indicar um sistema capaz de melhorar ou no mínimo manter a saúde do solo durante o processo de regeneração. Resultados inferiores ao da floresta indicariam que o sistema não se equipara às condições naturais da região Amazônica.

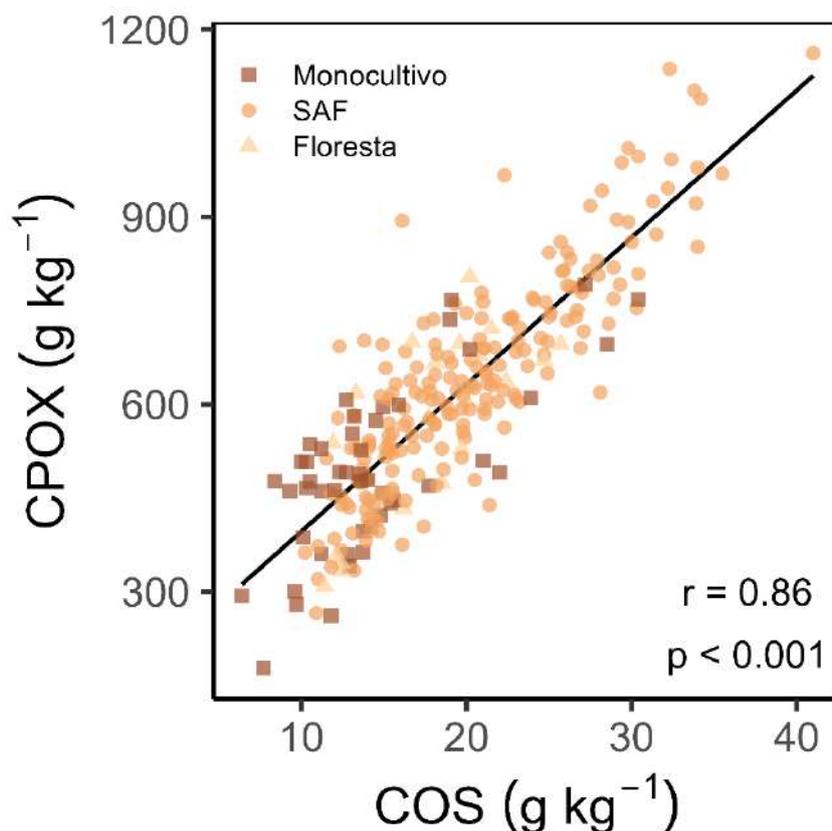


Figura 20 Correlação de Pearson entre carbono oxidável por permanganato (CPOX) e carbono orgânico do solo (COS) em sistemas de cobertura do solo na Amazônia oriental, Brasil.

O incremento superior de CPOX e COS nos SAFs e na floresta em relação ao monocultivo era esperado. Contudo, o monocultivo foi o único sistema que apresentou decréscimo de CPOX. O aumento de carbono ao longo do tempo nos SAFs está de acordo com o reportado para SAFs no Brasil (Siqueira *et al.*, 2019). O incremento em CPOX e COS nos SAFs pode ser atribuído à constante deposição de matéria orgânica ao solo pelas múltiplas fontes que variam em função da origem, ou seja, 1) origem interna: litterfall, ciclagem de raízes e poda da palma de óleo e das espécies da faixa diversificada; e 2) origem externa: adubação orgânica. Sugerimos que essas fontes de carbono proporcionam um ambiente favorável para a atividade de organismos do solo que atuam na incorporação de C e, conseqüentemente, melhoram a saúde do solo. Assim como reportado em outros estudos sobre o C do solo nesses sistemas.

O incremento positivo de CPOX na floresta está de acordo com os resultados em área de regeneração em florestas secundárias no Brasil (Sá *et al.*, 2018) e de florestas plantadas na China (Zhang *et al.*, 2012). O incremento em COS na floresta e a diferença entre as médias dos anos (aumento de 2018 para 2022) deve estar associado ao aporte de

C no litterfall e ciclagem (dinâmica) de raízes da vegetação nativa (Flor *et al.*, 2017; Sommer *et al.*, 2000).

As características físico-químicas inerentes ao solo determinam um limite máximo para a capacidade de armazenamento de C (Six *et al.*, 2002). Quando o solo atinge o limite máximo, a entrada matéria orgânica não resulta em incremento de C (Six *et al.*, 2002). Nossos resultados mostram que o limite de armazenamento ainda não foi atingido nas florestas e nos SAFs, visto que há incremento positivo de carbono em todas as zonas de manejo e nos SAFs como um todo. Esse aumento sugere que o manejo adotado nos SAFs e a ciclagem natural de carbono na floresta não apenas mantém o C do solo, mas continua a elevar os teores de C.

A redução do teor de CPOX de 2018 para 2022 e o incremento negativo e inferior em relação ao SAF e a floresta indicam diminuição da saúde do solo no monocultivo. Contudo, o teor de COS não variou durante esse intervalo, consistentemente com o fato de esse indicador de carbono apresentar menor sensibilidade às mudanças de curto prazo (Blair *et al.*, 1995; Strosser, 2010). Nossos resultados são consistentes com o decréscimo no teor de CPOX e estoques de COS a partir do terceiro ano de plantio de palma de óleo em monocultivo na Indonésia (Bruun *et al.*, 2013). A ciclagem de raízes e o empilhamento das folhas podadas de palma de óleo são as duas fontes principais de C para o solo em monocultivo de palma de óleo (Rüegg *et al.*, 2019). Assim, sugerimos que o aporte de C por essas duas fontes não foi suficiente para aumentar e nem mesmo manter os níveis de CPOX e COS no monocultivo ao longo do estudo.

4.4.2 Zonas de manejo

De fato, o empilhamento é a zona que apresenta melhor saúde do solo em sistemas de produção de palma de óleo (Frazão *et al.*, 2013; Goodrick *et al.*, 2015, 2016; Hok *et al.*, 2018; Nelson *et al.*, 2014). Consistentemente com a nossa hipótese, o C do solo aumentou em curto prazo nos SAFs, mas diminuiu no monocultivo. De fato, múltiplas pesquisas relatam a importância do empilhamento das folhas de palma de óleo para o aumento dos estoques/teores de C do solo. Embora seja intuitivo pensar que, no empilhamento, o acúmulo de folhas é fonte direta de C para o solo, o incremento de C acontece, na verdade, em função do crescimento do sistema radicular da palma de óleo em direção ao ambiente com melhores condições de desenvolvimento (disponibilidade de nutrientes, microclima, estrutura) (Rüegg *et al.*, 2019). Além das folhas de palma de

óleo sobre o solo, raízes e folhas de *T. cacao* foram encontradas na zona de empilhamento de SAFs nas mesmas áreas da nossa pesquisa, (Ramos *et al.*, 2018). Portanto, sugerimos que a manutenção da cobertura do solo, a deposição constante de material orgânico e a atividade de raízes nessa zona contribuem para aumentar o teor de C do solo ao longo do tempo na zona de empilhamento.

Em sistemas de monocultivo de palma de óleo, a adição de carbono orgânico na ACP acontece principalmente pela ciclagem de raízes da palma de óleo (Rüegg *et al.*, 2019). Uma fonte adicional de carbono (e nutrientes) em cultivos de palma de óleo é a aplicação de cachos de frutos vazios (adubo orgânico) realizada na ACP. A camada de cachos vazios aplicada cria um ambiente com temperatura, umidade e disponibilidade de nutrientes favoráveis para a atividade de organismos do solo (Tao *et al.*, 2018) e, conseqüentemente, para o aumento dos níveis de C no solo (Carron *et al.*, 2015; Gomes *et al.*, 2021; Mardegan *et al.*, 2022). Assim, sugerimos que para a ACP no monocultivo a contribuição das raízes foi suficiente para manter os níveis de CPOX, mas aumentou o COS; embora não tenhamos avaliado a qualidade do material vegetal, sugerimos que o C incorporado ao solo na floresta é composto por substâncias mais recalcitrantes, o que explicaria o aumento somente do COS. Para ACP nos SAFs, além do efeito das raízes da palma de óleo, sugerimos que o aumento em CPOX e COS se deve principalmente à adubação orgânica no sistema, que é uma fonte adicional de C.

O CAR é reconhecidamente uma zona de manejo que apresenta o pior nível (ou status) de saúde do solo em comparação com as demais zonas (PIL e ACP) em plantios de palma de óleo (Gomes *et al.*, 2021; Rahman *et al.*, 2021). O tráfego de máquinas, a baixa adição de material orgânico e a ausência de cobertura permanente em CAR intensificam a deterioração da condição física do solo, ocasionando a compactação do solo e conseqüentemente, a redução do espaço poroso e o aumento da resistência à penetração de raízes nessa zona de manejo, entre outros problemas (Oliveira *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2023). Assim, os resultados do monocultivo (declínio no CPOX e estabilidade no COS) são consistentes com declínio do C do solo em plantios de palma de óleo relatado em outra região da Amazônia (Frazão *et al.*, 2013). Contudo, o aumento ao longo do tempo nos níveis de CPOX e COS no CAR dos SAFs não era esperado. Sugerimos que os resíduos oriundos da roçagem da vegetação espontânea podem ter sido suficientes para aumentar os níveis de CPOX em curto prazo.

O incremento em CPOX e COS na faixa diversificada dos SAFs pode ser atribuído à deposição constante de material orgânico e à ciclagem do sistema radicular nessa zona.

Aumentos nos estoques de C do solo em SAFs geralmente são atribuídos a ciclagem do litterfall (Lenci *et al.*, 2022; Matos *et al.*, 2023), do material de poda das espécies cultivadas (Schneidewind *et al.*, 2019), da adubação orgânica (Lori *et al.*, 2022) e das raízes (Monroe *et al.*, 2016). Portanto, o litterfall do *T. cacao* e das outras espécies e os diferentes sistemas radiculares (em termos de arquitetura e composição química) devem ser os principais fatores para o incremento no CPOX e COS na faixa diversificada.

4.4.3 O CPOX captura mudanças de curto prazo na saúde do solo como o COS?

O monitoramento de curto prazo (2018-2022) mostrou que o CPOX capturou as mudanças de curto prazo semelhante ao COS, mas isso depende do sistema de cobertura do solo. Nos SAFs (incluindo suas zonas de manejo) e na floresta o COS e CPOX apresentaram, em geral, tendência de aumento. Por outro lado, no monocultivo (e nas suas zonas de manejo), o COS se manteve estável e o CPOX indicou declínio na saúde do solo. Essas respostas nos sistemas de cobertura de cobertura e nas zonas de manejo mostram que o CPOX e COS capturam mudanças na saúde do solo de maneira ligeiramente diferentes, provavelmente devido à natureza das substâncias que esses compartimentos (CPOX e COS) representam, embora nossos resultados mostrem que o CPOX e COS sejam fortemente correlacionados entre si ($r = 0.86$, $p < 0.001$). O acompanhamento dessas áreas deve ser mantido para que as tendências (aumento – SAFs e declínio – monocultivo) nos indicadores de saúde do solo encontradas neste estudo sejam confirmadas a longo prazo.

A correlação forte entre CPOX e COS que encontramos neste estudo é consistente com outros relatos (Duval *et al.*, 2018; Gruver, 2015; Plaza-Bonilla *et al.*, 2014; Romero *et al.*, 2018). Além disso, o CPOX é um indicador eficiente de saúde do solo porque é sensível ao manejo e sua análise é de execução fácil e custo baixo (Bongiorno *et al.*, 2019), além de poder ser executado em campo. Embora estudos recentes indiquem que o CPOX não reflete uma fração lábil de C (Christy *et al.*, 2023; Woodings & Margenot, 2023), o CPOX ainda é apontado como um bom indicador de saúde do solo.

4.5 Conclusão

Nossos resultados para CPOX e COS mostram que os sistemas agroflorestais com palma de óleo apresentam maior potencial para incremento no C do solo a curto prazo em

comparação à floresta e ao monocultivo de palma de óleo. As zonas de manejo nos SAFs apresentam maior capacidade de aumentar os níveis de C no solo em relação às zonas de manejo no monocultivo. A associação de adubação orgânica, poda, litterfall e diversidade de espécies pode ter sido a principal responsável pelo incremento de curto prazo na saúde do solo nos SAFs em comparação ao monocultivo.

O CPOX foi sensível para identificar mudanças a curto prazo, enquanto o COS, indicador de referência, foi menos eficiente em detectar mudanças a curto prazo. Nossos resultados têm implicações significativas para o monitoramento de curto prazo da saúde do solo em plantações de palma de óleo, o que pode ser crucial para antecipar intervenções de manejo com objetivo de melhorar a saúde do solo.

REFERÊNCIAS

- Almeida AS, Vieira ICG, Ferraz SFB. 2020. Long-term assessment of oil palm expansion and landscape change in the eastern Brazilian Amazon. *Land Use Policy* **90**: 104321. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104321
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, De Moraes Gonçalves JL, Sparovek G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* **22**: 711–728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Bates D, Mächler M, Bolker BM, Walker SC. 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* **67**. DOI: 10.18637/jss.v067.i01
- Blair GJ, Lefroy RD, Lisle L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*. DOI: 10.1071/AR9951459
- Bongiorno G, Bünemann EK, Oguejiofor CU, Meier J, Gort G, Comans R, Mäder P, Brussaard L, de Goede R. 2019. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators* **99**: 38–50. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.12.008
- Bruun TB, Egay K, Mertz O, Magid J. 2013. Improved sampling methods document decline in soil organic carbon stocks and concentrations of permanganate oxidizable carbon after transition from swidden to oil palm cultivation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **178**: 127–134. DOI: 10.1016/j.agee.2013.06.018
- Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, De Deyn G, de Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen JW, Brussaard L. 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030
- Carron MP, Pierrat M, Snoeck D, Villenave C, Ribeyre F, Suhardi, Marichal R, Caliman JP. 2015. Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. *Soil Research* **53**: 205–215. DOI: 10.1071/SR14249

- Castro Lopes AA, Sousa DMG, dos Reis FB, Figueiredo CC, Malaquias JV, Souza LM, Carvalho Mendes I. 2018. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional* **12**: 72–82. DOI: 10.1016/j.geodrs.2018.01.003
- Chatterjee N, Nair PKR, Chakraborty S, Nair VD. 2018. Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **266**: 55–67. DOI: 10.1016/j.agee.2018.07.014
- Christy I, Moore A, Myrold D, Kleber M. 2023. A mechanistic inquiry into the applicability of Permanganate oxidizable Carbon (PoxC) as a soil health indicator. *Soil Science Society of America Journal* 1083–1095. DOI: 10.1002/saj2.20569
- Culman SW, Snapp SS, Green JM, Gentry LE. 2013. Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance. *Agronomy Journal* **105**: 493–502. DOI: 10.2134/agronj2012.0382
- Duval ME, Galantini JA, Martínez JM, Limbozzi F. 2018. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: influence of management practices and edaphic conditions. *Catena* **171**: 316–326. DOI: 10.1016/j.catena.2018.07.023
- Fine AK, Schindelbeck RR. 2017. Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database. *Soil & Water Management & Conservation Statistics* **81**: 589–601. DOI: 10.2136/sssaj2016.09.0286
- Flor IC, Santos R Dos, Harter-Marques B. 2017. Litterfall Production At Different Successional Stages in a Tropical Rain Forest in Southern Brazil. *Ciência e Natura* **39**: 494. DOI: 10.5902/2179460x26019
- Frazão LA, Paustian K, Cerri CEP, Cerri CC. 2013. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. *GCB Bioenergy*. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2012.01196.x
- Gomes MF, Vasconcelos SS, Viana-Junior AB, Costa ANM, Barros PC, Ryohei Kato O, Castellani DC. 2021. Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. *Land Degradation and Development* **32**: 4313–4326. DOI: 10.1002/ldr.4038
- Goodrick I, Nelson PN, Banabas M, Wurster CM, Bird MI. 2015. Soil carbon balance following conversion of grassland to oil palm. *GCB Bioenergy* **7**: 263–272. DOI: 10.1111/gcbb.12138
- Goodrick I, Nelson PN, Nake S, Webb MJ, Bird MI, Huth N. 2016. Tree-scale spatial variability of soil carbon cycling in a mature oil palm plantation. *Soil Research* **54**: 397–406. DOI: 10.1071/SR15211
- Gruver J. 2015. Evaluating the sensitivity and linearity of a permanganate-oxidizable carbon method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **46**: 490–510. DOI: 10.1080/00103624.2014.997387
- Gu C, Liu Y, Mohamed I, Zhang R, Wang X, Nie X, Jiang M, Brooks M, Chen F, Li Z. 2016. Dynamic changes of soil surface organic carbon under different mulching practices in citrus orchards on sloping land. *PLoS ONE* **11**: 1–16. DOI: 10.1371/journal.pone.0168384

- Hok L, de Moraes Sá JC, Reyes M, Boulakia S, Tivet F, Leng V, Kong R, Briedis C, da Cruz Hartman D, Ferreira LA, Inagaki TM, Gonçalves DRP, Bressan PT. 2018. Enzymes and C pools as indicators of C build up in short-term conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia. *Soil and Tillage Research* **177**: 125–133. DOI: 10.1016/j.still.2017.11.015
- Jakovac CC, Peña-Claros M, Kuyper TW, Bongers F. 2015. Loss of secondary-forest resilience by land-use intensification in the Amazon. *Journal of Ecology* **103**: 67–77. DOI: 10.1111/1365-2745.12298
- Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* **61**: 4. DOI: 10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- Lenci LHV, Filho AAT, Weber OLS, Honoré EAD, Caldeira SF, Bortolini J. 2022. Carbon stock of tree biomass, litter and soil in rubber based agroforestry systems. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* **17**. DOI: 10.5039/agraria.v17i3a2406
- Li D, Niu S, Luo Y. 2012. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: A meta-analysis. *New Phytologist* **195**: 172–181. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x
- Lori M, Armengot L, Schneider M, Schneidewind U, Bodenhausen N, Mäder P, Krause HM. 2022. Organic management enhances soil quality and drives microbial community diversity in cocoa production systems. *Science of the Total Environment* **834**. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155223
- Mardegan SF, de Castro AF, Chaves SSNF, dos Santos Freitas RS, Avelar MS, Filho FAOT. 2022. Organic farming enhances soil carbon and nitrogen dynamics in oil palm crops from Southeast Amazon. *Soil Science and Plant Nutrition* **68**: 104–113. DOI: 10.1080/00380768.2022.2031285
- Matos PS, Pinto LA da SR, de Lima SS, Alves T de C, Cerri EP, Pereira MG, Zonta E. 2023. Soil organic carbon fractions in agroforestry system in Brazil: seasonality and short-term dynamic assessment. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **47**: 1–14. DOI: 10.36783/18069657rbcS20220095
- Matricardi EAT, Skole DL, Costa OB, Pedlowski MA, Samek JH, Miguel EP. 2020. Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* **369**: 1378–1382. DOI: 10.1126/SCIENCE.ABB3021
- Mendes IC, Souza LM, Sousa DMG, Lopes AAC, Reis-Junior FB, Lacerda MPC, Malaquias JV. 2019. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. *Applied Soil Ecology* **139**: 85–93. DOI: 10.1016/j.apsoil.2019.02.025
- Mesquita RDCG, Massoca PEDS, Jakovac CC, Bentos TV, Williamson GB. 2015. Amazon rainforest succession: stochasticity or land-use legacy? *BioScience* **65**: 849–861. DOI: 10.1093/biosci/biv108
- Moebius-Clune BN, Moebius-Clune D, Gugino B, Idowu OJ, Schindelbeck RR, Ristow AJ, van Es H, Thies J, Shayler H, McBride M, Wolfe D, Abawi G. 2016. *Comprehensive assessment of soil health - The Cornell framework manual*. . DOI: 10.1080/00461520.2015.1125787

- Monroe PHM, Gama-Rodrigues EF, Gama-Rodrigues AC, Marques JRB. 2016. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **221**: 99–108. DOI: 10.1016/j.agee.2016.01.022
- Nelson PN, Banabas M, Nake S, Goodrick I, Webb MJ, Gabriel E. 2014. Soil fertility changes following conversion of grassland to oil palm. *Soil Research* **52**: 698–705. DOI: 10.1071/SR14049
- Noirot LM, Müller-Stöver DS, Wahyuningsih R, Sørensen H, Sudarno, Simamora A, Pujianto, Suhardi, Caliman JP. 2022. Impacts of empty fruit bunch applications on soil organic carbon in an industrial oil palm plantation. *Journal of Environmental Management* **317**. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115373
- Oliveira RLL, Vasconcelos SS, Teixeira WG, Viana-Junior AB, Castellani DC, Kato OR. 2022. Management practices affect soil carbon and physical quality in oil palm agroforestry systems in the Amazon. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. DOI: 10.1007/s42729-022-00947-0
- Pachêco NA, Bastos TX, Creão LGC. 2009. *Boletim Agrometeorológico de 2008 para Tomé-Açu, PA*.
- Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. 2014. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. *Soil and Tillage Research* **139**: 19–22. DOI: 10.1016/j.still.2014.01.006
- Putz FE, Redford KH. 2010. The importance of defining “Forest”: Tropical forest degradation, deforestation, long-term phase shifts, and further transitions. *Biotropica* **42**: 10–20. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2009.00567.x
- Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, Vogel HJ. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* **314**: 122–137. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.11.009
- Rahman N, Giller KE, Neergaard A De, Magid J, Ven G Van De, Bech T. 2021. The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. *Journal of Environmental Management* **278**: 111446. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111446
- Ramos HMN, Vasconcelos SS, Kato OR, Castellani DC. 2018. Above- and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. *Agroforestry Systems* **92**: 221–237. DOI: 10.1007/s10457-017-0131-4
- Rodrigues TE, Santos PL dos, Rollim PAM, Santos E, Rego RS, Silva JML da, Valente MA, Gama JRN. 2001. *Caracterização e Classificação dos Solos do Município de Tomé-Açu, PA*. Embrapa Amazônia Oriental: Belém
- Romero CM, Engel RE, D’Andrilli J, Chen C, Zabinski C, Miller PR, Wallander R. 2018. Patterns of change in permanganate oxidizable soil organic matter from semiarid drylands reflected by absorbance spectroscopy and Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Organic Geochemistry* **120**: 19–30. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2018.03.005
- Rüegg J, Quezada JC, Santonja M, Ghazoul J, Kuzyakov Y, Buttler A, Guillaume T.

2019. Drivers of soil carbon stabilization in oil palm plantations. *Land Degradation & Development* 1–12. DOI: 10.1002/ldr.3380
- Sá JC de M, Gonçalves DRP, Ferreira LA, Mishra U, Inagaki TM, Furlan FJF, Moro RS, Floriani N, Briedis C, Ferreira A de O. 2018. Soil carbon fractions and biological activity based indices can be used to study the impact of land management and ecological successions. *Ecological Indicators* **84**: 96–105. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.08.029
- Saputra DD, Sari RR, Hairiah K, Roshetko JM, Suprayogo D, van Noordwijk M. 2020. Can cocoa agroforestry restore degraded soil structure following conversion from forest to agricultural use? *Agroforestry Systems* **94**: 2261–2276. DOI: 10.1007/s10457-020-00548-9
- Schneidewind U, Niether W, Armengot L, Schneider M, Sauer D, Heitkamp F, Gerold G. 2019. Carbon stocks, litterfall and pruning residues in monoculture and agroforestry cacao production systems. *Experimental Agriculture* **55**: 452–470. DOI: 10.1017/S001447971800011X
- Siqueira CCZ, Chiba MK, Moreira RS, Abdo MTVN. 2019. Carbon stocks of a degraded soil recovered with agroforestry systems. *Agroforestry Systems* **9**. DOI: 10.1007/s10457-019-00470-9
- Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* **241**: 155–176. DOI: 10.1023/A:1016125726789
- Sommer R, Denich M, Vlek PLG. 2000. Carbon storage and root penetration in deep soils under small-farmer land-use systems in the Eastern Amazon region , Brazil. *Plant and Soil* **219**: 231–241. DOI: 10.1023/a:1004772301158
- Souza PR, de Lima HV, da Silva GB, dos Santos Moura A. 2023. Limiting Water Content for Compaction Induced by Mechanized Operations in the Soil with Oil Palm in the Eastern Amazon. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **23**: 6167–6182. DOI: 10.1007/s42729-023-01474-2
- Strosser E. 2010. Methods for determination of labile soil organic matter: An overview. *Journal of Agrobiolgy* **27**: 49–60. DOI: 10.2478/s10146-009-0008-x
- Tao HH, Snaddon JL, Slade EM, Henneron L, Caliman JP, Willis KJ. 2018. Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **256**: 105–113. DOI: 10.1016/j.agee.2017.12.012
- Tisdall J., Oades JM. 1982. Organic Matter in Water-stable Aggregates. *Journal of Soil Science* **33**: 141–163. DOI: 10.1016/b978-1-85573-813-3.50021-4
- USDA. 2015a. Soil quality indicators. *Natural Resources Conservation Service*, 2
- USDA. 2015b. Chemical indicators and soil functions. *USDA Fact Sheet*, 1–3
- USDA. 2015c. Soil quality indicators : Biological indicators and soil functions. *USDA Natural Resources Conservation Service* 1–4
- Weil RR, Islam KR, Stine M a, Gruver JB, Samson-Liebig SE. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use.

American Journal of Alternative Agriculture **18**: 3–17. DOI: 10.1079/ajaa2003003

Woodings FS, Margenot AJ. 2023. Revisiting the permanganate oxidizable carbon (POXC) assay assumptions: POXC is lignin sensitive. *Agricultural & Environmental Letters* **8**: 2–7. DOI: 10.1002/ael2.20108

Zhang S, Wen J, Li T, Xu X, Deng L, Gong G, Hu C. 2012. Soil carbon fractions of restored lands in Liusha River Valley, Sichuan. *Ecological Engineering* **40**: 27–36. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.12.001

Zuur AF, Ieno EN, Walker N, Saveliev AA, Smith GM. 2009. *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer New York: New York, NY. DOI: 10.1007/978-0-387-87458-6

APÊNDICE A – Aplicação da BioAnálise em sistemas agroflorestais e monocultivo de palma de óleo na Amazônia Oriental

Com os resultados obtidos neste estudo foi possível realizar a aplicação da ferramenta BioAnálise (BioAS) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. A ferramenta BioAS agrega indicadores químicos (pH, cálcio - Ca, magnésio - Mg, fósforo - P, potássio - K, alumínio - Al, capacidade de troca de cátions - CEC, acidez potencial – H+Al, saturação por alumínio - AS, saturação por bases - BS e soma de bases – Bsum) e indicadores biológicos (enzimas betaglucosidase – Beta e arylsulfatase – Aryl) nas três principais funções do solo: ciclagem (F1) e armazenamento (F2) e suprimento (F3), de nutrientes. A avaliação estatística dos resultados desta pesquisa mostra que os sistemas agroflorestais com palma de óleo apresentam maiores níveis de indicadores de saúde do solo em comparação ao monocultivo.

A BioAS tem sido amplamente aplicada em sistemas de plantio de grãos no Cerrado brasileiro. Contudo, na Amazônia oriental, uma das principais culturas comerciais é a palma de óleo, que é majoritariamente plantada em monocultivo, que são associados à perda de biodiversidade, emissão de gases do efeito estufa e redução dos estoques de carbono. Como alternativa aos monocultivos, na Amazônia, sistemas agroflorestais (SAFs) com palma de óleo têm sido implantados. Por isso, a necessidade de validar/ avaliar o desempenho dos sistemas de produção óleo de acordo com a BioAS.

Cálculo e laudos da BioAnálise

Calculamos o índice de qualidade do solo e as funções de acordo com o método proposto por Larson and Pierce 1991 and Karlen 1994. O SQI é composto por três funções do solo: ciclagem, armazenamento e suprimento de nutrientes. Cada função é composta por variáveis do solo: a ciclagem pelas enzimas beta-glucosidase e arylsulfatase; a função armazenamento pela matéria orgânica do solo, pela CTC e teor de argila; e a suprimento é composta pelo K, Mg, Ca, saturação por base, soma de bases, pH, H+Al, Al e P. Cada função foi padronizada para apresentar scores entre 0 e 1. Mais detalhes sobre o cálculo das funções e do índice de qualidade do solo podem ser encontrados em Mendes et al. (2021).

A ferramenta BioAS categoriza o índice de qualidade do solo e as funções ciclagem, suprimento, armazenamento em muito baixo, baixo, médio, alto ou muito alto,

de acordo com os scores que variam de 0 a 1 (Figura 1). A partir dessa categorização é possível determinar se o solo está em condições de “solo doente”, “em recuperação” ou “solo saudável”.

Aplicamos a avaliação da BioAS para cada fazenda avaliada.

Análise colorimétrica

Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
0 a 0.20	0.21 a 0.40	0.41 a 0.60	0.61 a 0.80	0.81 a 1.00

Fonte: Embrapa/Ieda

Laudo BioAnálise para sistemas de cobertura do solo (independente de utilização de práticas de manejo)

Condição do solo	F1	F2
Solo saudável		
Solo adoecendo		
Solo doente		
Solo em recuperação		

Fonte: Embrapa/Mendes (2020)

Laudo BioAS para sistemas de produção (com utilização de práticas de manejo)

Cronossequência mostrando os estágios de qualidade de um solo degradado durante seu processo de recuperação vistos através do laudo da BioAS

Condição do solo	F1	F2	F3
Solo doente/baixa qualidade			
Solo doente/baixa qualidade			
Solo em recuperação (estágio inicial)			

Solo em recuperação (estágio intermediário)			
Solo em recuperação (estágio avançado)			
Solo saudável/alta qualidade			

Fonte: Embrapa/Mendes (2020)

Aplicação da BioAnálise

BioAS para sistemas de cobertura do solo

O SAF apresentou pontuações classificadas como “Alta” na F1 e F2, 0.71 e 0.94 respectivamente. O monocultivo teve pontuações “Alta” nas funções F1 (0.58) e F2 (0.77). Por fim, a floresta seguiu o mesmo padrão de SAF e monocultivo com pontuações “Alta” na F1 (0.66) e F2 (0.92). De acordo com o laudo colorimétrico para sistemas de cobertura do solo em geral, os solos dos SAFs, monocultivos e florestas são classificados como “solo saudável”

Fazenda	Sistema de cobertura do solo	F1	F2
1	SAF	0.7	0.9
2	SAF	0.71	0.95
3	SAF	0.68	0.97
1	Floresta	0.68	0.99
2	Floresta	0.68	0.9
3	Floresta	0.63	0.89
4	Monocultivo	0.59	0.56
5	Monocultivo	0.57	0.98

O laudo da BioAS que considera os sistemas de cobertura do solo mostrou que todos os sistemas (monocultivo, SAF e floresta) estão em condição de “Solo saudável”. Logo, o manejo adotado/ausência de manejo é suficiente para garantir a saúde do solo

nesses sistemas. Além disso, a produção de cacho de fruto de palma de óleo nos SAFs se equipara ao relatado para monocultivos (Débora Castellani, comunicação pessoal), o que pode ser um reflexo de solo capaz de suprir as demandas das culturas.

BioAS para sistemas de produção

Na função F1Ciclagem, a pontuação dos SAFs nas fazendas 1, 2 e 3 variaram de 0.68 a 0.71. Os monocultivos, nas fazendas 4 e 5 apresentaram pontuação 0.57 e 0.59, respectivamente.

Na função F2Armazenamento, os SAFs apresentaram pontuação de 0.90 a 0.97. Os monocultivos apresentaram pontuação de 0.56 a 0.98.

Na função F3Suprimento, os SAFs apresentaram pontuação de 0.63 a 0.71. Os monocultivos apresentaram pontuação de 0.54 e 0.55 nas fazendas 4 e 5, respectivamente.

Na escala colorimétrica, as pontuações dos solos dos SAFs, na F1Ciclagem, foram classificadas como “Alto”; na F2Armazenamento, “Muito Alto”; na F3Suprimento, “Alto”. As pontuações dos solos dos monocultivos foram classificadas na F1 como “Médio”; na F2Armazenamento, a fazenda 4 foi classificada como “Médio” e a fazenda 3 como “Muito Alto”; na F3Suprimento, “Médio”.

Considerando os estágios de recuperação por meio do laudo da BioAS, os solos dos SAFs das três fazendas foram considerados como “Solos saudáveis/alta qualidade”. Enquanto o monocultivo da fazenda 4 foi considerado como “Solo doente/baixa qualidade” e o monocultivo da fazenda 5 foi considerado como “Solo doente/baixa qualidade”.

Fazenda	Sistema de cobertura do solo	F1Ciclagem	F2Armazenamento	F3Suprimento
1	SAF	0.7	0.9	0.71
2	SAF	0.71	0.95	0.64
3	SAF	0.68	0.97	0.63
4	Monocultivo	0.59	0.56	0.56
5	Monocultivo	0.57	0.98	0.54

Para os sistemas de produção de palma de óleo, no qual consideramos a F3Suprimento, que está intimamente correlacionada com adubação e calagem, os SAFs apresentaram solo em condição de “Solo saudável” e o monocultivo em condição de “Solo doente”. Conforme explicado anteriormente, esse resultado pode estar relacionado com as diversas fontes de nutrientes disponíveis somente nos SAFs (litterfall, poda, diversidade de raízes e adubos orgânicos), visto que os SAFs e monocultivos utilizam a calagem e adubação química e, ainda assim, os solos dos monocultivos apresentam pontuação mais baixas na F3.

As pontuações das funções são calibradas em função da produtividade de grãos e de parâmetros biológicos (arylsulfatase e beta-glucosidase) e químicos (pH, Ca, Mg, P, K, Al, saturação por alumínio, saturação por bases, soma de bases e acidez potencial) de Latossolos (mesmo tipo de solo predominante na região Amazônica) do bioma Cerrado (MENDES et al., 2021). Reconhecemos que a ausência desses mesmos parâmetros para solos da Amazônia e para produtividade de SAFs e da palma de óleo nessa região podem ter influenciado nos resultados. Contudo, avaliação mais detalhada da BioAS revela que o monocultivo de palma de óleo apresenta tendências de perda de saúde do solo.

MENDES, I. C. et al. Soil quality and grain yield: A win–win combination in clayey tropical oxisols. *Geoderma*, v. 388, n. June 2020, 2021.

APÊNDICE B – Sistema agroflorestal mais diversificado da fazenda 2 (linha dupla de palma de óleo e caminho da colheita)



APÊNDICE C – Faixa diversificada do sistema agroflorestal mais diversificado da fazenda

2.



APÊNDICE D – Sistema agroflorestal menos diversificado da fazenda 2 (linha de palma de óleo, empilhamento de folhas podadas de palma de óleo e faixa diversificada)



APÊNDICE E – Faixa diversificada do sistema agroflorestal mais diversificado da fazenda 2



APÊNDICE F: Vista frontal do sistema agroflorestal mais diversificado da fazenda 3 (faixa diversificada, empilhamento de folhas podadas de palma de óleo, linha de palma de óleo e caminho da colheita)



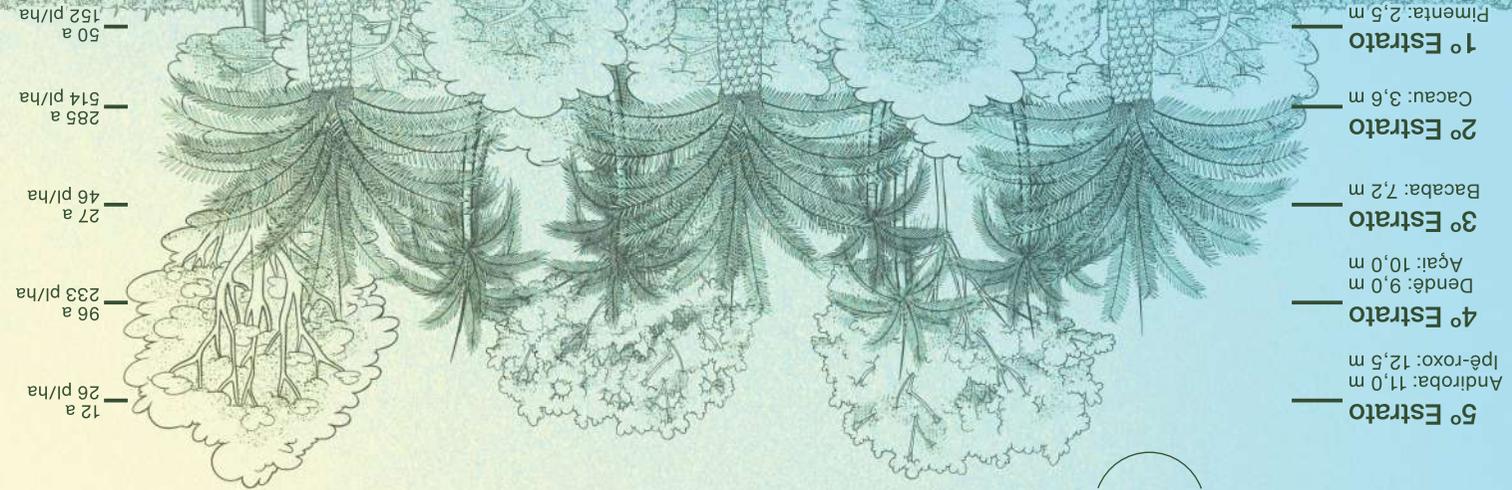
APÊNDICE G: Sistema agroflorestal menos diversificado da fazenda 3 (caminho da colheita, linha de palma de óleo, empilhamento de folhas podadas de palma de óleo e faixa diversificada)



APÊNDICE H – Deposição de resíduos orgânicos de origem interna dos sistemas agroflorestais na fazenda 2



ANEXO A – Folder informativo SAF-Dendê



CONTÉM
BIOMIMÉTICA

- Impacto Positivo**
- + Diversidade de renda
 - + Produção de alimentos e matéria-prima
 - + Bem-estar para o agricultor e agricultura
 - + Autonomia alimentar (soberania alimentar)
 - + Eficiência no controle de pragas e doenças
 - + Resiliência e adaptação às mudanças climáticas
 - + Teor de matéria orgânica no solo
 - + Conservação do solo e da água
 - + Sequestro de carbono
 - + Biodiversidade
 - + Segurança para o agricultor frente ao mercado
 - + Uso de recursos locais: menor demanda de insumo externo
- RELACIONAMENTO
GANHA-GANHA

Aprendizados do SAF Dendê

- Dendê apresenta bom desenvolvimento e produtividade em sistemas agroflorestais;
- Cacau se adapta bem ao sub-bosque do dendê;
- Maior demanda de mão de obra são para as atividades de colheita, poda e roçagem;
- Baixa incidência de problemas nutricionais, pragas e doenças (<2%);
- Uso de máquinas é importante no manejo da matéria orgânica e colheita;
- Produtividade de dendê, cacau, açaí e andiroba aumentam com o tempo;
- Na agrofloresta a temperatura média é 5 graus mais baixa que o ambiente externo;
- Práticas agroecológicas contribuem para a resiliência do sistema;
- Diversidade de produtos favorece a viabilidade econômica dos sistemas;
- Segurança alimentar, controle biológico, sequestro de carbono, qualidade do solo, conservação da água e da biodiversidade são os principais serviços ecossistêmicos;
- SAF Dendê gera diversos benefícios econômicos e socioambientais.



Para mais informações
#safdende

Apoio Financeiro: Natura 2007-2020 | Finep 2008-2011 | USAID 2016-2020



SAF DENDÊ

inovação e sustentabilidade

**Manejo e produção de dendê
em sistemas agroflorestais**

saf dendê

SISTEMA AGROFLORESTAL COM DENDÊ

Quais são os componentes do SAF Dendê?



Quais são os usos das espécies escolhidas?

As espécies escolhidas têm múltiplos usos e funções no sistema. Os usos incluem produtos para consumo e comercialização.

CONTÉM
AGRICULTURA
REGENERATIVA



Oleaginosas

Espécies que são fontes de óleos e manteigas usados como ingredientes vegetais



Adubação Verde

Espécies produtoras de biomassa e fonte de nutrientes para as plantas e microvida embaixo da terra, melhorando a fertilidade do solo e a produtividade



Alimentos

Espécies que produzem alimentos como frutos, palmito, raízes e sementes



Madeiras

Espécies que produzem madeira, toras, lenha e carvão

Quais são as espécies agrícolas, florestais e adubadeiras?

Agrícolas: dendê, mandioca, banana*, pimenta, maracujá, cacau, açaí, bacaba, margaridão*, feijão de porco* e feijão guandu*.

Florestais: andiroba, ucuúba, jatobá, ipê, mogno, guanandi, taxi branco, taperebá*, pracaxi*, ingá*, gliricídia*, tento* e urucum*.

*adubação verde

Como foi a implantação do SAF Dendê

Variedade de Dendê:

Embrapa BRS | Tipo Tenera nigrensis

Histórico de uso da terra:

3 Unidades Demonstrativas | 18 hectares

- Pomar abandonado (UD1)
- Capoeira (UD2)
- Pastagem degradada (UD3)

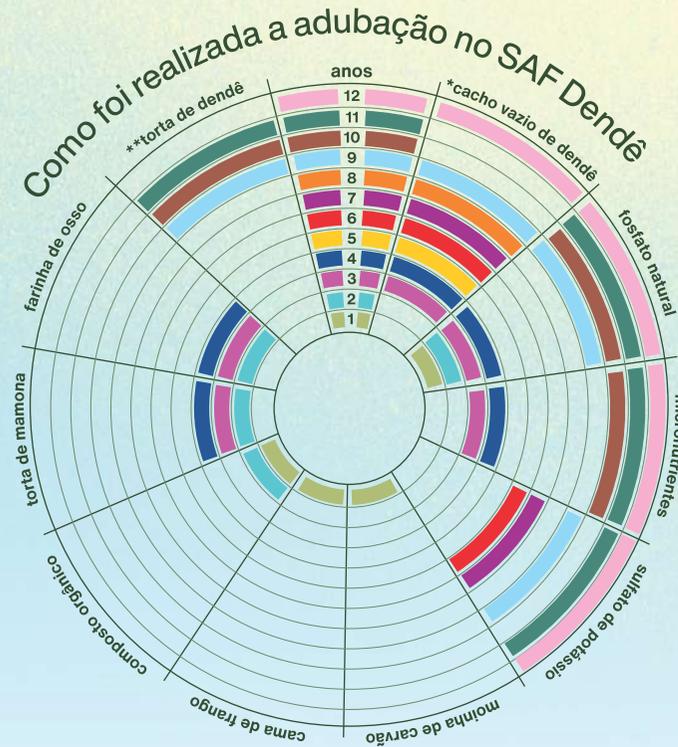
Época do plantio: Fevereiro de 2008

Tipo de SAF Dendê: Adubadeira (99 pl/ha)
Biodiverso (81 a 99 pl/ha)

Preparo da área: Manual e Mecanizado

Manejo agroecológico: Adubação orgânica, adubação verde, cobertura viva, biocaldas, etc

CONTÉM
ECONOMIA
CIRCULAR



- calagem: ano 1 e ano 9
- adubação orgânica: dendê (150 a 220 kg*/pl) e (30 a 40 kg**/pl); cacau (2 kg**/pl) e açaí (5 kg**/pl).
- adubação verde/ano: 30 t/ha (até ano 3) e 10 t/ha (a partir do ano 4)



Demanda de mão-de-obra ao longo do ano

