



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
DOUTORADO EM AGRONOMIA

LUCÉLIA ROSA DE JESUS COSTA

**FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA
DE ÓLEO NA AMAZÔNIA**

BELÉM

2022

LUCÉLIA ROSA DE JESUS COSTA

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.

Área de concentração: Agronomia

Orientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos

BELÉM

2022

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

C837f Costa, Lucélia Rosa de Jesus Costa
FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA
AMAZÔNIA / Lucélia Rosa de Jesus Costa Costa. - 2022.
88 f. : il. color.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de
Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2022.
Orientador: Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos Vasconcelos

1. Adubação orgânica. 2. Calagem. 3. Variabilidade espacial. 4. Matéria orgânica. 5. Qualidade do solo.
I. Vasconcelos , Steel Silva Vasconcelos , *orient.* II. Título

CDD 631.422


LUCÉLIA ROSA DE JESUS COSTA

**FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE
ÓLEO NA AMAZÔNIA**


Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do curso de doutorado em Agronomia, área de concentração Agronomia, para obtenção do Título de Doutor.

Aprovado em julho de 2022

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 STEEL SILVA VASCONCELOS
Data: 03/04/2023 11:20:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Steel Silva Vasconcelos – Orientador
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

Documento assinado digitalmente
 GILSON SERGIO BASTOS DE MATOS
Data: 03/04/2023 12:21:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gilson Sérgio Bastos de Matos – 1ª Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Prof. Dr^a. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia – 2º Examinador
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB

Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama – 3º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Prof. Dr. Rafael Silva Guedes – 4º Examinador
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus pelo dom da vida e por toda a força que me deu durante o processo do doutorado.

Ao meu esposo André William pelo apoio incondicional durante toda a minha vida acadêmica, obrigada pela parceria e companheirismo de sempre, meu amor.

Agradeço aos meus sogros e cunhadas pelas orações e por dedicarem do seu tempo para me ajudar sempre que precisei.

À minha família que mesmo distante sempre esteve torcendo por mim e em especial à minha irmã Ana Lúcia por sentir comigo as minhas dores e por sempre ter orado por mim.

Ao meu querido orientador Steel Vasconcelos, a quem tenho enorme admiração e respeito como pessoa e profissional, jamais esquecerei do que o senhor fez por mim. Muito obrigada pela paciência e ensinamentos que certamente levarei para a minha vida!

Um agradecimento especial à Mila Façanha por ter me amparado e estado comigo durante todo o processo de execução dessa tese, obrigada pela paciência e companheirismo que certamente fizeram a diferença na minha vida nessa fase. Obrigada por ter ficado ao meu lado e pegado na minha mão em todos os momentos.

Ao professor Gilson Matos por toda a colaboração, conselhos e parcerias na escrita da tese e dos artigos. Meu muito obrigada!

Ao Dr. Rafael Guedes por todo o apoio durante a execução do doutorado bem como contribuições na banca de qualificação, defesa e escrita dos artigos. Meu muito obrigada!

Aos membros da minha banca de defesa por todas as valiosas contribuições, meu muito obrigada!

Ao professor Mário Lopes por todo o apoio a mim concedido durante a minha pós-graduação. Muito obrigada!

Às minhas amigas Patrícia Andrade e Camila Brandão pelas madrugadas comigo, me ajudando e apoiando no processo. Às amigas Flávia Rafaela e Camille Ferreira pelo companheirismo e parceria de sempre.

Aos meus colegas com quem pude contar durante a minha caminhada na Embrapa na sala dos estagiários (Maryelle Machado, Felipe Menezes, Julie França, Gisele Nerino, Natália Dias e Kaleb Ribeiro), meu muito obrigada pelo companheirismo durante essa caminhada.

Ao grupo do SAF-Dendê e colaboradores da Embrapa Amazônia Oriental (CPATU), em especial a todos a quem tive a oportunidade de conhecer e que sempre me apoiaram para a execução da tese (Amanda Paiva, Everson Lima, Ivanildo Trindade, João Almeida, Mila Façanha, Miltom Nascimento, Priscila Barros e Leonardo Oliveira) e pelo compartilhamento de conhecimentos, fundamental para o crescimento profissional. Meu muito obrigado!

À Neusa Ferreira pelo companheirismo em todas as fases do meu doutorado e por todo o auxílio e ensinamento nas análises no laboratório. Muito obrigada!

À Universidade Federal Rural da Amazônia e ao Programa de Pós-graduação da Ufra, Belém, pela oportunidade do doutorado. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa. Aos agricultores que contribuíram para a realização desta pesquisa. À Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), Natura Inovação e Tecnologia de Produtos-Ltda, Embrapa Amazônia Oriental (CPATU), Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal (ICRAF), e a Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAID).

A todas as pessoas que não foram citadas, mas que direta ou indiretamente contribuíram para a finalização do doutorado e com quem tive a oportunidade de conhecer e conviver em determinados momentos do curso. Meu muito obrigada!

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2

Figura 1- Localização da área experimental (a) contendo dois sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e uma floresta secundária (FLO). (b) no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental. Em (c, SAF-A) e (d, SAF-B), as siglas representam as zonas de manejo onde o solo foi amostrado: coroamento (ACP), carreador (CAR), empilhamento (PIL) e faixa diversificada (DIV).....46

Figura 2 - Valores médios de pH do solo, alumínio trocável (Al), acidez potencial (H + Al) e saturação por Al (m) na camada 0-20 cm do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....47

Figura 3 - Teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P) na camada 0-20 cm do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e floresta (FLO) em Tomé - Açu, Amazônia Oriental.....48

Figura 4 - Capacidade de troca de cátions potencial ($CTC_{pH\ 7}$), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V%) na camada 0-20 cm dos solos em sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....49

Figura 5 - Variação percentual dos atributos químicos do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) em relação à floresta (FLO).....50

Figura 6 - Valores médios do pH do solo, alumínio trocável (Al), acidez potencial (H + Al) e saturação por Al (m%) em diferentes camadas do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....51

Figura 7 - Teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P) em diferentes camadas do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....52

Figura 8 - Capacidade de troca de cátions potencial ($CTC_{pH\ 7}$), Capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V%) em diferentes camadas do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....53

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Localização dos Sítios (Sítio 1, 2 e 3) com sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....79

Figura 2 - Localização das zonas de manejo e pontos de amostragem de solos em sistemas agroflorestais de palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. ACP significa área de coroamento da palma de óleo; CAR, carreador; PIL, empilhamento de folhas de palma de óleo; DIV, faixa diversificada e; o losango representa os locais da amostragem de solos.....80

Figura 3 - Variação A) pH do solo, B) fósforo (P), C) potássio (K), D) cálcio (Ca), E) magnésio (Mg), F) alumínio trocável (Al), G) acidez potencial (H + Al), H) saturação por alumínio (m%), I) capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH 7}), J) capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), K) matéria orgânica (MO) e L) saturação por bases (V%) entre zonas de manejo em diferentes camadas do solo em sistemas agroflorestais de palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil.....81

Figura 4 - Análise de componentes principais (PCA) dos atributos químicos do solo nas camadas: A) 0-5, B) 5-10, C) 10-20 e D) 20-30 cm do solo nos sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....82

Figura 5 - Análise de componentes principais (PCA) dos atributos químicos do solo nas camadas de solo E) 30-50, F) 50-70 e G) 70-100 cm nos sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....83

Figura 6 - Matriz de correlação dos resultados da análise de correlação pereada dos atributos químicos do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....84

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Granulometria do solo das áreas de estudo SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....42

Tabela 2 - Aporte de nutrientes por espécies plantadas sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....43

Tabela 3 - Histórico de adubação e correção da acidez do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....44

CAPÍTULO 3

Tabela 1- Caracterização granulométrica dos Sítios de sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....73

Tabela 2 - Caracterização granulométrica dos Sítios de sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....74

Tabela 3- Plantas consorciadas com palma de óleo em sistemas agroflorestais em três Sítios experimentais em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....75

Tabela 4 - Histórico de adubação e correção da acidez do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.....76

Tabela 5 - Análise da tabela de desvio do pH do solo, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio trocável (Al), acidez potencial (H + Al), saturação por alumínio (m%), capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH 7}), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V%) entre as zonas de manejo em sistemas agroflorestais com palma de óleo.....78

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	10
REFERÊNCIAS	13
2 FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	18
RESUMO.....	18
ABSTRACT	19
2.1 Introdução	20
2.2 Material e Métodos.....	22
2.3 Resultados	26
2.4 Discussão	27
2.6 Conclusão	32
REFERÊNCIAS	33
3 VARIAÇÃO ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL	54
RESUMO.....	54
ABSTRACT	55
3.1 Introdução	55
3.2 Material e Métodos.....	57
3.3 Resultados	61
3.4 Discussão	63
3.5 Conclusões	66
REFERÊNCIAS	66
ANEXOS	85

RESUMO

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma palmeira oleaginosa amplamente cultivada em regiões tropicais e de grande importância econômica, comumente utilizada nas indústrias de alimentos, cosméticos e biocombustível. O cultivo dessa palmeira na Amazônia tem sido realizado, em sua grande maioria, nos moldes convencionais (monocultivo). Contudo, o uso intensivo dessa prática pode acarretar a degradação biológica, física e química do solo. Sistemas agroflorestais (SAF) com palma de óleo associados a práticas de manejo conservacionistas têm sido propostos como alternativa mais sustentável ao monocultivo. O objetivo do estudo foi avaliar se os sistemas agroflorestais com palma de óleo e as práticas de manejo afetam a fertilidade do solo. O estudo foi conduzido no município de Tomé-Açu, Pará, em três Sítios experimentais (Sítios 1, 2 e 3) do projeto SAF-Dendê. Em cada Sítio havia dois tipos de sistemas agroflorestais com palma de óleo: 1) SAF menos biodiverso (palma de óleo + leguminosas); e 2) SAF mais biodiverso (palma de óleo + espécies frutíferas e madeiras). No Sítio 2, foi selecionado um fragmento de floresta secundária como área referência (FLO) para comparação da fertilidade do solo com os SAFs. Em cada sistema foram estabelecidas ao acaso quatro parcelas. Nos SAFs, a coleta de amostras de solos nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70 e 70-100 cm foram realizadas em locais específicos dentro de cada parcela (zonas de manejo): coroamento (ACP), carreador (CAR), empilhamento (PIL) e faixa diversificada (DIV). Na floresta, demarcamos um ponto aleatório por parcela para a amostragem de solo nas mesmas camadas dos cultivos. Avaliamos os efeitos dos sistemas (SAFs e FLO) na camada arável (0-20 cm) e nas camadas ao longo do perfil do solo (0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm) sobre os atributos químicos: acidez ativa (pH), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), alumínio (Al), matéria orgânica (MO), acidez potencial (H+Al), capacidade de troca de cátions potencial ($CTC_{pH\ 7}$), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e) saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%). Também foi avaliada a variabilidade dos parâmetros de fertilidade das diferentes zonas de manejos nos SAFs até a camada 100 cm do solo. Em geral, a acidez nos solos cultivados foi estatisticamente menor em relação ao da floresta, tanto para camada arável quanto nas camadas estratificadas. Na camada 0-20, o pH foi aproximadamente 20% maior nos solos dos cultivos do que no da floresta. Os teores de nutrientes (Ca, Mg, K e P) no solo dos cultivos foram estatisticamente maiores do que no da floresta. Os aumentos foram de 290, 280, 80 e 800%, respectivamente. A V (%) foi em média 212% maior nos cultivos do que na floresta. As zonas de manejo ACP, DIV e PIL apresentaram em geral níveis de fertilidade semelhantes entre si quando comparado ao CAR, principalmente nas camadas superficiais. Calagem, adubações com fontes minerais e orgânicas e manutenção da matéria orgânica sobre solo podem contribuir para melhoria da fertilidade do solo em sistemas de cultivo de palma de óleo. Portanto, nossos resultados sugerem que o cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais combinados à adoção de práticas conservacionistas pode contribuir para a manutenção da fertilidade do solo em níveis adequados para as espécies cultivadas nesses sistemas.

Palavras-chaves: Adubação orgânica. Calagem. Variabilidade espacial. Matéria orgânica. Qualidade do solo

ABSTRACT

The oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is an oil palm widely cultivated in tropical regions and of great economic importance, commonly used in the food, cosmetics and biofuel industries. The cultivation of this palm in the Amazon has been carried out, for the most part, in conventional (monoculture) patterns. However, the intensive use of this practice can lead to biological, physical and chemical degradation of the soil. Agroforestry systems (SAF) with oil palm associated with conservation management practices have been proposed as a more sustainable alternative to monoculture. The objective of the study was to evaluate whether agroforestry systems with oil palm and management practices affect soil fertility. The study was conducted in the municipality of Tomé-Açu, Pará, in three experimental sites (sites 1, 2 and 3) of the SAF-Dendê project. At each site there were two types of agroforestry systems with oil palm: 1) less biodiverse SAF (oil palm + legumes); and 2) more biodiverse SAF (oil palm + fruit and timber species). At site 2, a secondary forest fragment was selected as a reference area (FLO) for comparison of soil fertility with SAFs. Four plots were randomly established in each system. In the SAFs, the collection of soil samples in the layers 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70 and 70-100 cm were performed in specific locations within each plot (management zones): crowning (ACP), carrier (CAR), stacking (PIL) and diversified range (DIV). In the forest, we demarcate a random point per plot for soil sampling in the same layers of crops. We evaluated the effects of the systems (SAFs and FLO) on the arable layer (0-20 cm) and layers along the soil profile (0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm) on the chemical attributes: active acidity (pH), calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), phosphorus (P), aluminum (Al), organic matter (MO) potential acidity (H+Al), potential cation exchange capacity ($CTC_{pH\ 7}$), effective cation exchange capacity (CTCe) aluminum saturation (m%) and base saturation (V%). It was also evaluated the variability of fertility parameters of the different management zones in the SAFs up to 100 cm soil layer. In general, the acidity in the cultivated soils was statistically lower in relation to that of the forest, both for arable layer and stratified layers. In the 0-20 layer, the pH was approximately 20% higher in the soils of the crops than in the forest. The levels of nutrients (Ca, Mg, K and P) in the soil of the crops were statistically higher than in the forest. The increases were 290, 280, 80 and 800%, respectively. V (%) was on average 212% higher in crops than in forest. The management zones ACP, DIV and PIL showed in general similar fertility levels when compared to CAR, especially in the superficial layers. Liming, fertilization with mineral and organic sources and maintenance of organic matter on soil can contribute to improve soil fertility in oil palm cultivation systems. Therefore, our results suggest that the cultivation of oil palm in agroforestry systems combined with the adoption of conservation practices can contribute to the maintenance of soil fertility at adequate levels for the species grown in these systems.

Keywords: Organic fertilization. Liming. Spatial variability. Organic matter. Soil quality

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma palmeira oleaginosa de origem africana, pertencente à família Arecaceae (MÜLLER, 1980), que começou a ser cultivada no Brasil em meados do século XX (HOMMA, 2016). Essa oleaginosa apresenta como subproduto dois tipos de óleos: dendê e de palmiste, extraídos da polpa e da amêndoa, respectivamente (MÜLLER; FURLAN JÚNIOR; CELESTINO FILHO, 2006). Seus óleos são comumente utilizados nas indústrias de cosméticos, siderurgia, biocombustíveis e alimentícios (absorvendo 72% do óleo de palma produzido no mundo) (HANSEN et al., 2015; BRASIL, 2018). Devido à sua disponibilidade e diversidade de usos, a demanda cresceu para 55,3 milhões de toneladas em 2012/2013, tornando-o o óleo vegetal mais produzido no mundo e nos últimos anos o uso se intensificou para produção de biocombustível (VILLELA et al., 2014).

Atualmente, a palma de óleo é a oleaginosa de maior produtividade no mundo (HANSEN et al., 2015), com maior rendimento de óleo por hectare (3.700 kg) superando o de óleo de soja (627 kg por hectare) e o de amendoim (857 kg por hectare) (BRASIL, 2018). O rendimento médio é de 20 a 22 t ha⁻¹ ano⁻¹ de cacho de fruto fresco (CFF) e produtividade entre 4 e 5 toneladas de óleo ha⁻¹ (SEDAP, 2021). É amplamente cultivada em regiões tropicais onde a Indonésia e a Malásia se destacam como os maiores produtores mundiais, sendo responsáveis por aproximadamente 84% da produção global. O Brasil é o 9º maior produtor mundial, ficando atrás apenas da Colômbia na América latina (USDA, 2020).

O Brasil produz em média 300 mil toneladas de óleo de palma e a maior parte provém do estado do Pará, cuja área plantada é 231.669 ha. O estado do Pará, localizado na Amazônia oriental, contribui com aproximadamente 90% da produção total do país (BRASIL, 2018). O cultivo de palma de óleo no estado é favorecido pelas condições edafoclimáticas e disponibilidade de terras agricultáveis (ABRAPALMA, 2021, SEDAP, 2021; RAMALHO FILHO et al., 2010).

Na Amazônia, historicamente, o cultivo de palma de óleo é realizado após a conversão pastagens e florestas primárias e em regeneração (ALMEIDA et al., 2020) e, mais recentemente, tornou-se restrito a áreas degradadas, que são em sua maioria provenientes da agricultura itinerante e pastagens (BENAMI et al., 2018). O cultivo nessas regiões ocorre prioritariamente em sistemas convencionais (monocultivo) e com

altos insumos químicos e maquinários (KATO et al., 2011). Na implantação dos cultivos, é comum no preparo de área o uso de derrubada, retirada e/ou queima da vegetação para a limpeza da área (VIÉGAS; YAKUWA, 2019; KATO et al., 2011), seguida do revolvimento do solo. Como práticas de manejo e manutenção da cultura, ocorre a aplicação de altas doses de fertilizantes minerais e herbicidas (RAMALHO FILHO et al., 2010; GOME JUNIOR, 2010, SILVA et al., 2018). Tais práticas podem acarretar impactos negativos sobre o solo como diminuição da biodiversidade (FITZHERBERT et al., 2008) e degradação química (IWATA et al., 2012), física e biológica (LAL, 2015), que afetam a sua qualidade (AHAMADOU; HUANG, 2013) a curto ou longo prazos.

Em alternativa ao cultivo convencional, surgem os sistemas agroflorestais (SAFs), principalmente para os pequenos produtores amazônidas que, no geral, possuem dificuldades de acesso a crédito e insumos e, por isso, devem buscar sistemas alternativos e viáveis economicamente (KATO et al., 2011). Estudos relatam o cultivo de palma de óleo em SAFs (RAMOS et al., 2018; CARVALHO et al., 2014; MAIA et al., 2021, KHASANAH et al., 2020). Os SAFs contribuem para o armazenamento de carbono acima e abaixo do solo, manutenção/aumento da serrapilheira (contribuindo para manter a cobertura morta sobre o solo), ciclagem de nutrientes e proteção contra erosão (PAES et al., 2020; PEZARICO et al., 2013; JUNQUEIRA et al., 2013; ASIGBAASE et al., 2021; NOVAIS et al., 2007), consequentemente contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo (FONTE; BARRIOS; SIX, 2010; SUÁREZ et al., 2021). Esses sistemas constituem uma prática conservacionista que, atualmente, tem sido sugerida para a implantação de cultivos de palma de óleo na Amazônia, pois racionaliza o uso e o manejo dos recursos naturais (solo, água e biodiversidade) (FREITAS et al., 2010). Tais sistemas requerem um manejo diferenciado da fertilidade do solo tendo como fundamento a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (NOVAIS et al., 2007).

O sistema de produção da palma de óleo apresenta distinta variabilidade espacial nos parâmetros de fertilidade do solo, determinada pelo manejo (NELSON et al., 2014, 2015). Várias práticas de manejo podem influenciar essa variabilidade nos cultivos de palma de óleo, dentre estes tem-se: a adubação orgânica via deposição no solo das folhas podadas e cachos de frutos vazios (CARRON et al., 2015, 2016; TAO et al., 2016).

Estudos têm relatado efeito positivo sobre o solo de sistemas que depositam a materiais orgânicos, visto que a deposição desses materiais poderá elevar o teor de matéria orgânica e potencializar a fertilidade desses solos via ciclagem de nutrientes, favorecendo a qualidade e sustentabilidade desses sistemas. Aumentos nos níveis de

fertilidade onde há aplicação de cachos de frutos vazios e empilhamento de folhas da palma de óleo, além de registros quanto a aumentos no estoque de carbono orgânico no solo, biomassa microbiana e macrofauna, tem sido reportados na literatura (BOAFO et al., 2020a; CARRON et al., 2016; FORMAGLIO et al., 2021; TAO et al., 2016).

A palma de óleo é altamente exigente em nutrientes (CORLEY; TINKER, 2016; RAMALHO FILHO et al., 2010) e, por isso, realizar o manejo sustentável do solo com a devida compreensão de suas propriedades ajuda a manter ou melhorar o nível de fertilidade do solo, qualidade e evitar a sua degradação. A compreensão adequada da distribuição espacial das propriedades do solo e seu mapeamento é a chave para o manejo do solo específico do local para a produção sustentável de culturas por aplicação de taxa variável de nutrientes (BEHERA et al., 2018).

Na região de Tomé-Açu, localizada no Nordeste Paraense, Amazônia Oriental, os sistemas agroflorestais com palma de óleo são uma das poucas experiências com palma de óleo diversificado na Amazônia. Esses sistemas fazem parte do projeto SAF-Dendê: Inovação e sustentabilidade, implantado no município de Tomé-Açu, em 2008, que visa desenhar um sistema diversificado de produção de dendê garantindo a qualidade do solo, a biodiversidade e a diversificação da renda de agricultores familiares sob práticas conservacionistas. Alguns estudos já foram realizados sistemas: como a avaliação da colonização micorrízica e estoques de carbono acima e abaixo do solo (MAIA et al., 2021; RAMOS et al, 2018; CARVALHO et al., 2014), entretanto não há estudos nessas áreas com foco na fertilidade do solo, que é um importante indicador de sua qualidade. Identificar práticas conservacionistas alternativas ao cultivo convencional de palma de óleo é fundamental para a redução dos impactos negativos sobre o solo, a fim de manter a sua fertilidade e seu cultivo sustentável.

Assim, há necessidade de reduzir a intensidade do manejo convencional sem sacrificar a produtividade no cultivo de palma de óleo. Logo, buscar alternativas de manejo que não reduzam a qualidade do solo é importante para manter a sustentabilidade dos sistemas por longo prazo. O manejo sustentável dos nutrientes do solo com a compreensão adequada da variabilidade espacial dos parâmetros de fertilidade do solo pode ajudar a aumentar a produtividade das culturas, evitar a degradação do solo e manter níveis adequados da fertilidade do solo.

Dividi essa tese em três capítulos, sendo o capítulo 1 a contextualização do tema e os outros dois capítulos os artigos científicos gerados por meio dessa pesquisa. No capítulo 2 abordamos a influência dos sistemas agroflorestais com palma de óleo e

floresta sobre a fertilidade do solo; no capítulo 3 comparamos o efeito de diferentes zonas de manejo no sistema agroflorestal com palma de óleo sobre os atributos químicos do solo para avaliar a variabilidade espacial da fertilidade nesse sistema de cultivo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Avaliar se os sistemas agroflorestais com palma de óleo e as práticas de manejo empregadas nestes sistemas afetam a fertilidade do solo.

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar a, acidez ativa, acidez potencial, teor de alumínio, cálcio, magnésio, fósforo, potássio e matéria orgânica, capacidade de troca de cátions potencial, capacidade de troca de cátions efetiva, saturação por alumínio e saturação por bases em sistemas agroflorestais com palma de óleo e floresta nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm do solo.

Determinar a acidez ativa, acidez potencial, teor de alumínio, cálcio, magnésio, fósforo, potássio e matéria orgânica, capacidade de troca de cátions potencial, capacidade de troca de cátions efetiva, saturação por alumínio e saturação por bases em sistemas agroflorestais com palma de óleo em diferentes zonas de manejo nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70 e 70-10 cm do solo.

REFERÊNCIAS

ABRAPALMA. 2021. **Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma**. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/pt/sobre-a-abrapalma/>. Acesso em: 21 jun. 2021.

AHAMADOU, B.; HUANG, Q. Impacts of Agricultural Management Practices on Soil Quality. **Molecular Environmental Soil Science**. p. 429-480, 2013.

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.

ASIGBAASE, M.; DAWOE, E.; SJGERSTEN, S.; LOMAX, B. H. Decomposition and nutrient mineralisation of leaf litter in smallholder cocoa agroforests: a comparison of organic and conventional farms in Ghana. **Journal of Soils and Sediments**. v. 21, p.1010–1023, 2021.

BEHERA, S. K.; MATHUR, R. K.; SHUKLA, A. K.; SURESH, K.; PRAKASH, C. Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. **Catena**, v. 165, n. February, p. 251–259, 2018.

BENAMI, E.; CURRAN, L. M.; COCHRANE, M.; VENTURIERI, A.; FRANCO, R.; KNEIPP, J.; SWARTOS, A. 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.

BOAFO, D. K.; KRAISORNPORNSON, B.; PANPHON, S.; OWUSU, B. M.; AMANIAMPONG, P. N. Effect of organic soil amendments on soil quality in oil palm production. **Applied Soil Ecology**, v. 147, 2020.

BRASIL. **Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo no Brasil**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília: Mapa/ACE, 2018. 57 p.

CARRON, M. P.; PIERRAT, M.; SNOECK, D.; VILLENABI, C. Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. **Soil Research**, v. 53, n. 2, p. 205–215, 2015.

CARRON, M. P.; AURIAC, Q.; SNOECK, D.; VILLENABI, C.; BLANCHART, E.; RIBEYRI, F.; MARICHAL, R.; DARMINTO, M.; CALIMAN, J. P. Do the impact of organic residues on soil quality extend beyond the deposition area under oil palm? **European Journal of Soil Biology**, v. 75, p. 54–61, 2016.

CARVALHO, W. R.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; CAPELA, C. J. B.; CASTELLANI, D. C. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforestry Systems**. v. 88, p. 357-368, 2014.

CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. Mineral Nutrition of Oil Palms. **The Oil Palm**, p. 329–398, 2016.

FITZHERBERT, E. B.; STRUEBIG, M. J.; MOREL, A.; DANIELSEN, F.; BRÜHL, C. A.; DONALD, P. F.; PHALAN, B. How will oil palm expansion affect biodiversity? **Trends in Ecology and Evolution**. v. 23 (10), p. 538–545, 2008.

FONTE, S. J.; BARRIOS, E.; SIX, J. Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. **Geoderma**. v. 155, p. 320–328, 2010.

FORMAGLIO, G.; VELDKAMP, E.; DAMRIS, M.; TJOA, A.; CORRE, M. D. 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.

FREITAS, P. L. de; RAMALHO FILHO, A.; MOTTA, P. E. F. da; TEIXEIRA, W. G. Planejamento conservacionista e procedimentos para a instalação de palmares na Amazônia. *In*: RAMALHO FILHO et al. (2010). **Zoneamento Agroecológico, Produção e Manejo para a Cultura da Palma de Óleo na Amazônia**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro – RJ, 2010. p. 73-80.

GOMES JUNIOR, R. A. **Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2010.

HANSEN, S. B; PADFIELD, R; SYAYUTI, K; EVERS, S; ZAKARIAH, Z; MASTURA, S. Trends in Global Palm Oil Sustainability. **Research, Journal of Cleaner Production**. v. 100, p. 140-149, 2015.

HOMMA, A. K. O. **Cronologia do cultivo do dendezeiro na Amazônia**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. 48 p. (Documentos / Embrapa Amazônia Oriental, ISSN 1983-0513; 423).

IWATA, B. de F; LEITE, L. F. C; ARAÚJO, A. S. F; NUNES, L. A. P. L; GENHING, C; CAMPOS, L. P. Agroforestry systems and its effects on chemical attributes of an Ultisol in the “Cerrado” of Piauí State, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 16, p. 730–738, 2012.

JUNQUEIRA, A.; SCHLINDWEIN, M.; CANUTO, J.; NOBRE, H.; SOUZA, T. Sistemas agroflorestais e mudanças na qualidade do solo em assentamento de reforma agrária. **Revista Brasileira de Agroecologia**. v. 8, p. 102–115, 2013.

KATO, O. R.; VASCONCELOS, S. S.; CAPELA, C. J.; MIRANDA, I. de S.; LEMOS, W. de P.; MAUES, M. M.; AZEVEDO, R. de; CASTELLANI, D. C.; THOM, G. Projeto Dendê em Sistemas Agroflorestais na Agricultura Familiar. **Congresso Brasileiro De Sistemas Agroflorestais**, v. 8, n. 1, p. 7, 2011.

KHASANAH, N; VAN NOORDWIJK, M; SLINGERLAND, M; SOFIYUDIN, M; STOMPH, D; MIGEON, A. F; HAIRIAH, K. Oil Palm Agroforestry Can Achieve Economic and Environmental Gains as Indicated by Multifunctional Land Equivalent Ratios. **Frontiers in Sustainable Food Systems**. v. 3, p. 1-13, 2020.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**. MDPI, Open Access Journal, v. 7(5), p. 1-21, 2015.

MAIA, R. da S.; VASCONCELOS, S. S.; VIANA-JUNIOR, A. B.; CASTELLANI, D. C.; KATO, O. R. Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. **Agroforestry Systems**. v. 95 p. 731-740, 2021.

MÜLLER, A. A. **A cultura do dendê**. Belém, PA: EMBRAPA-CPATU. 1980. 24 p. (EMBRAPA-CPATU. Miscelânea, 5).

MÜLLER, A. A.; FURLAN JÚNIOR, J.; CELESTINO FILHO, P. A **Embrapa Amazônia Oriental e o agronegócio do dendê no Pará**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 67 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 257). ISSN 1517-2201.

NELSON, P. N.; WEBB, M. J.; BANABAS, M.; NAKE, S.; GOODRICK, I.; GORDON, J.; GRADY, D. O.; DUBOS, E. Methods to account for tree-scale variability in soil- and plant-related parameters in oil palm plantations. **Plant and Soil**, v. 374, n. 1–2, p. 459–471, 2014.

NELSON, P. N.; BANABAS, M.; GOODRICK, I.; WEBB, M. J.; HUTH, N. I.; GRADY, D. O. 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.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. 1, 1017p. 2007.

PAES, E. de C.; DIAS, F. P. M.; FERNANDES, I. O.; PEREIRA, E. G.; LIMA, J. M.; ALCOFORADO, P. A. U. G.; NÓBREGA, J. C. A. Different Soil Management Systems Promote Improvements in Nutrient Content and Litter Input. **Journal of Sustainable Forestry**. v. 40, p. 528-538, 2020.

PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**. v. 56, p. 40-47, 2013.

RAMALHO-FILHO, A.; MOTTA, E. F.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G. **Zoneamento Agroecológico, Produção e Manejo para a Cultura da Palma de Óleo na Amazônia**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 216 p.

RAMOS, H. M. N.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; CASTELLANI, D. C. Above- and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in Eastern Amazonia. **Agroforestry Systems**. v. 92, p. 221–237. 2018.

SEDAP. 2021. **Secretária de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca**. 682 Disponível: <http://www.sedap.pa.gov.br/content/dend%C3%AA>. Acesso em: 21 de jun. 2021.

SILVA, C. S. da; MENDONÇA, B. A. F. de; PEREIRA, M. G.; ARAÚJO, E. J. G. de; CASTELLANI, D. C. Spatial dependency and correlation of properties of soil cultivated with oil palm, *Elaeis guineensis*, in agroforestry systems in the eastern Brazilian Amazon. **Acta Amazônica**. v. 48, p. 280-289, 2018.

SUÁREZ, L. R; SALAZAR, J. C. S; CASANOVES, F; BIENG, M. A. N. Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.314, p. 1-15, 2021.

TAO, H. H.; SLADE, E. M.; WILLS, K. J.; CALIMAN, J. P.; SNADDON, J. L. Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm

plantation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 218, p. 133–140, 2016.

USDA, 2020. **United States Department of Agriculture**. Disponível em: https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000&sel_year=2019. Acesso em: 20 mai. 2021.

VIÉGAS, I. J. M.; PIMENTEL, M. J. O.; GALVÃO, J. R.; SILVA, D. A. S.; FERREIRA, E. V. O.; SILVA JÚNIOR, M. L.; YAKUWA, T. K. M.; LIMA, S. K. S. Adubação mineral na fase produtiva da palma óleo (*Elaeis guineenses* Jacq) cultivado na região Amazônica. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.6, p. 274-286, 2019.

VILLELA, A. A.; JACCOUD, D. B.; ROSA, L. P.; FREITAS, M. V. Status and prospects of oil palm in the Brazilian Amazon. **Biomass and bioenergy**. v. 67, p. 270-278. 2014.

2 FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

Sistemas agroflorestais com palma de óleo associados a práticas de manejo conservacionista têm sido propostos como alternativa mais sustentável ao monocultivo. Então, avaliamos se sistemas agroflorestais com palma de óleo (menos biodiverso e mais biodiverso) sob manejo conservacionista contribuem para melhorar a fertilidade do solo (indicador de sustentabilidade do solo) usando como referência um fragmento de floresta secundária. Analisamos os efeitos dos sistemas na camada arável (0-20 cm) e nas camadas ao longo do perfil do solo (0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm) sobre: acidez ativa (pH), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), alumínio (Al), matéria orgânica (MO), acidez potencial (H^+Al), capacidade troca de cátions potencial ($CTC_{pH7,0}$), capacidade troca de cátions efetiva (CTC_e), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%). Em geral, a acidez nos solos dos sistemas agroflorestais foi menor em relação a da floresta em todas as camadas. Na camada arável, pH e os teores de Ca, Mg, K, P e a V (%) foram maiores nos sistemas agroflorestais do que na floresta. Calagem, adubações com fonte mineral e orgânica e manutenção da matéria orgânica sobre solo podem ter contribuído para melhoria da fertilidade do solo nos sistemas agroflorestais com palma de óleo. Nossos resultados sugerem que, na Amazônia Oriental, o cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais associado a práticas conservacionistas pode contribuir para a manutenção da fertilidade do solo em níveis adequados para as espécies cultivadas nesses sistemas.

Palavras chave: Adubação orgânica. Calagem. Diversificação da palma de óleo. Manejo Conservacionista. Matéria orgânica do solo.

ABSTRACT

Oil palm agroforestry systems associated with conservation management practices have been proposed as a more sustainable alternative to monoculture. On this basis, we examined whether oil palm agroforestry systems (less and more diversified) under conservation management contribute to improving soil fertility (an indicator of soil sustainability), using a secondary forest fragment as a reference. We analyzed the effects of the systems on the following variables in the arable layer (0-20 cm) and in the layers along the soil profile (0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm): active acidity (pH), calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), phosphorus (P), aluminum (Al), organic matter (OM), potential acidity (H+Al), potential cation-exchange capacity, effective cation-exchange capacity, aluminum saturation (AS%), and base saturation (BS%). Overall, soil acidity was lower in the agroforestry systems than in the forest, in all layers. In the arable layer, the pH, Ca, Mg, K, P, and BS values were higher in the agroforestry systems than in the forest. Liming, mineral and organic fertilization, and the maintenance of organic matter on the soil may have contributed to improving soil fertility in the oil palm agroforestry systems. Our results suggest that, in the eastern Amazon, oil palm growing in agroforestry systems associated with conservation practices can contribute to the maintenance of soil fertility at adequate levels for the species cultivated in these systems.

Keywords: Conservation management. Liming. Oil palm diversification. Organic fertilization. Soil organic matter.

2.1 Introdução

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.), oleaginosa cultivada em regiões tropicais, é a cultura mais importante em relação a produção e comércio no mundo (Rahman et al. 2021). O óleo de palma é amplamente utilizado nas indústrias de alimentos, cosméticos, siderurgia e biocombustíveis (Hansen et al. 2015; Rahman et al. 2021). No Brasil, a área de plantações de palma de óleo tem aumentado expressivamente e o estado do Pará, pertencente a Amazônia, é responsável por 90% da produção de óleo total do país (Benami et al. 2018). Essa cultura tem se expandido rapidamente nas últimas décadas devido as altas demandas de mercado, principalmente, por países em desenvolvimento (Kurnia et al. 2016).

Existe grande interesse de mercado para que a produção de óleo de palma seja certificada pela *Roundtable on Sustainable Palm Oil* (RSPO), organização que estabelece padrões para a produção de óleo de forma sustentável (Tayleur et al. 2018). Um dos principais critérios para a certificação é melhorar a sustentabilidade do solo (Roundtable on Sustainable Palm Oil. 2013), o que inclui diretrizes relacionadas à fertilidade do solo (Luke et al. 2019). Portanto, melhorias na fertilidade do solo, que é um importante indicador da qualidade e sustentabilidade do solo (Ahamadou and Huang 2013; Carron et al. 2015), é um dos aspectos importantes de plantios de palma de óleo que visem a obtenção do certificado de produção sustentável.

Na Amazônia, o cultivo convencional da palma de óleo é realizado após a conversão de pastagens e, em menor quantidade, de florestas primárias e em regeneração (Benami et al. 2018; Almeida et al. 2020). O preparo de área para implantação da palma de óleo envolve incorporação do material vegetal no solo (pastagens) ou corte-e-queima da vegetação (florestas) (Gomes Júnior et al. 2010; Viégas et al. 2019) e o manejo do cultivo requer geralmente altas doses de fertilizantes minerais e herbicidas (Ramalho-Filho et al. 2010; Silva et al. 2018). Tais práticas usadas no preparo de área e durante o cultivo podem causar degradação química (Iwata et al. 2012), física e biológica do solo (Iwata et al. 2012), portanto reduzindo a sua qualidade (Ahamadou and Huang 2013). A palma de óleo pode alternativamente ser cultivada em sistemas diversificados, que são potencialmente mais sustentáveis que o cultivo convencional, tais como: consórcio com leguminosas perenes (Carvalho et al. 2014) e culturas anuais (Franzini et al. 2017; Dhandapani et al. 2020), e sistemas agroflorestais (SAFs) (Carvalho et al. 2014; Ramos et al. 2018, Khasanah et al. 2020; Maia et al. 2021).

Sistemas agroflorestais são reconhecidamente um modelo de exploração do solo que mais se aproxima ecologicamente de uma floresta natural (Nair 1993). Nos sistemas agroflorestais, árvores (interesse madeireiro) são cultivadas em associação com culturas agrícolas e/ou pastagens e espécies animais (Somarriba 1992; Young 1997). O cultivo de sistemas agroflorestais tem grande potencial de alcançar sustentabilidade agrícola e reduzir os efeitos negativos da agricultura, como a degradação do solo (Albrecht and Kandji 2003; Boafó et al. 2020). Finalmente, sistemas agroflorestais são indicados para a implantação de cultivos de palma de óleo na Amazônia e em outras regiões do mundo (Bhagwat and Wills 2008; Freitas et al. 2010).

O cultivo de uma cultura em sistemas agroflorestais apresenta vantagens em relação ao convencional (monocultura), como maior estoque de carbono acima e abaixo do solo (Niether et al. 2019), ciclagem de nutrientes, proteção contra erosão (Junqueira et al. 2013; Pezarico et al. 2013; Paes et al. 2020) e fertilidade do solo (Fonte et al. 2010; Suárez et al. 2021). Sistemas agroflorestais geralmente apresentam alta capacidade de restabelecer estoques de matéria orgânica, que é a principal fonte de nutrientes para as plantas em solos Amazônicos não cultivados, além de contribuir para a formação de cargas nos solos (Mantovanelli et al. 2016). Logo, o aumento da produção agrícola na Amazônia, onde os solos têm baixa fertilidade natural (Junqueira et al. 2016), requer a adoção de práticas de manejo que aportem maior quantidade de material orgânico sobre o solo. Da mesma forma, o uso de resíduos orgânicos para fins de adubação pode potencializar os efeitos positivos da matéria orgânica sobre a fertilidade do solo. Cachos vazios, efluente da agroindústria e folhas podadas de palma de óleo são aplicados como fertilizantes para compensar as perdas de nutrientes e ajudar a reduzir o custo associado ao uso adubação mineral nos plantios dessa cultura (Sulaiman et al. 2011; Moradi et al. 2014; Carron et al. 2015; Aholoukpè et al. 2016; Rahman et al. 2018; Formaglio et al. 2021).

Existem poucos relatos de estudos sobre cultivos de palma de óleo em sistemas diversificados como, por exemplo, sistemas agroflorestais. Estudos disponíveis na literatura sobre solo em sistemas diversificados com palma de óleo foram desenvolvidos no Brasil, Indonésia e Malásia. Esses estudos avaliaram estoque de carbono no solo (Carvalho et al. 2014; Ramos et al. 2018; Besar et al. 2020), colonização de fungos micorrízicos no solo (Maia et al. 2021) e enriquecimento da biodiversidade (fauna e flora) (Teuscher et al. 2016). Contudo, há pouca informação sobre a fertilidade do solo nesses tipos de cultivo de palma de óleo em geral e na Amazônia brasileira. Desse modo, o

objetivo principal desse estudo foi avaliar se os sistemas agroflorestais com palma de óleo sob manejo conservacionista mantêm a fertilidade do solo em níveis adequados para a cultura.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Local do estudo

O estudo foi conduzido em uma propriedade rural localizada no município de Tomé-Açu, na mesorregião Nordeste do Pará, Brasil (02°20'54"S, 48°15'44"W) (Figura 1). O clima local é tropical quente-úmido (Ami), conforme classificação de Köppen (Alvares et al. 2013), com precipitação média anual de 2300 mm, temperatura média anual de 26 °C e umidade relativa do ar em torno de 85%. A precipitação varia entre 54 mm (agosto) e 440 mm (março) (Pacheco and Bastos 2008). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Amarelo (Rodrigues et al. 2001) e apresenta elevada acidez, baixa fertilidade natural (EMBRAPA 2016) e textura média (Tabela 1).

2.2.2 Condições experimentais

Antes da instalação do experimento, a área estudada compreendia uma floresta em regeneração de aproximadamente 11 anos de idade, resultando do abandono de cultivo agrícola após repetidos ciclos de corte e queima para agricultura de subsistência (*Oryza sativa*, *Manihot esculenta*, *Zea mays* e *Vigna unguiculata*). Em 2007, um fragmento de aproximadamente 4 ha dessa floresta foi cortado e triturado mecanicamente (Carvalho et al. 2014), e o material triturado foi depositado sobre o solo, formando uma cobertura morta. Em 2008, foi aplicado a lanço 1.3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico para correção da acidez do solo. O cálculo da necessidade do calcário foi realizado pelo método do alumínio trocável descrito em Veloso et al. (2020). No mesmo ano, foram implantados dois tipos de sistema de cultivo de palma de óleo: sistema agroflorestal menos biodiverso (SAF-A) e sistema agroflorestal mais biodiverso (SAF-B), cada um com 2 ha de área. Além dos sistemas de cultivo de palma de óleo, avaliamos um fragmento de floresta secundária (FLO) de aproximadamente 20 anos com 2 há, adjacente aos SAFs. A floresta foi usada como área referência para comparação dos níveis de fertilidade do solo.

O híbrido intraespecífico de palma de óleo Tenera foi plantado junto com: (1) espécies de adubação verde, no SAF-A e (2) espécies diversas para produção de frutos, madeira e outros produtos não-madeireiros, além de adubação verde, no SAF-B. Em ambos os sistemas, as mudas de palma de óleo foram plantadas em linhas duplas (7.5 m entre linhas x 9.0 m entre plantas), que foram intercaladas por faixas de plantio das outras espécies (denominada de faixa diversificada), cuja largura era 15 m. As espécies que constituíram cada cultivo em 2018 e o aporte de nutrientes via *litterfall* são descritos na Tabela 2.

Na implantação dos sistemas, nas covas de plantio da palma de óleo, foi aplicada a combinação de 0,3 kg planta⁻¹ de fosfato reativo de rocha Arad (P₂O₅ total 33%, Ca 37%) kg de e carvão vegetal moído (P₂O₅ 3,36 %; N 0,51 %; K₂O 4.85 %, Mg 2,7 %) baseado na análise do solo e na recomendação de adubação para a cultura para o estado do Pará (Franzini et al. 2020). As adubações de manutenção anual são descritas na Tabela 3. Na palma de óleo a adubação de manutenção foi realizada na área de coroamento (raio de 60 cm a partir da base da planta). A adubação potássica anual foi dividida em duas aplicações (janeiro/fevereiro e maio/junho). Não houve adubação das espécies plantadas na faixa diversificada, exceto para *E. oleracea* e *T. cacao* no SAF-B (Tabela 3). Em dezembro de 2017, calcário dolomítico foi aplicado com implemento de distribuição de corretivos acoplado ao trator por toda a linha dupla de palma de óleo e manualmente a lanço na faixa diversificada em ambos os sistemas.

Além das adubações de manutenção, as plantas espontâneas foram removidas de 3 a 5 vezes por ano ao redor da palma de óleo e as folhas mais velhas foram podadas 1 a 2 vezes por ano. As folhas podadas foram empilhadas entre as filas duplas de palma de óleo e as faixas diversificadas (Figura 2). O material podado de cacau e leguminosas era deixado sobre o solo na faixa diversificada. O trator que realizava a colheita e aplicava calcário trafegava entre as linhas de palma de óleo, onde o único manejo aplicado era a roçagem da vegetação espontânea. Ambos os sistemas foram manejados com práticas conservacionistas como o não revolvimento do solo, manutenção da cobertura do solo, adubação verde e adubação orgânica.

2.2.3 Coleta de amostras de solo, processamento e análises

Em 2018, em cada sistema de cultivo de palma de óleo, estabelecemos ao acaso quatro parcelas medindo 30 x 30 m (de modo a incluir duas faixas diversificadas e uma fila dupla de palma de óleo) e quatro parcelas medindo 10 x 10 m na FLO. Nos SAFs, coletamos amostras de solo em quatro locais (zonas de manejo) em cada parcela: (1) coroamento da palma de óleo - zona em que as plantas indesejadas foram removidas e onde foi aplicada adubação, localizada a 60 cm da base do estipe do dendezeiro- (ACP); (2) zona de tráfego de máquinas-carreador (CAR), (3) empilhamento de folhas - zona em que as folhas da palma de óleo eram depositadas (PIL); e (4) faixa diversificada (inclui plantio das outras espécies) (DIV) (Figura 2). Na FLO, demarcamos um ponto aleatório por parcela para a amostragem.

Em julho de 2018, em cada parcela coletamos com trado oito amostras simples para formação de uma amostra composta nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm, tanto nas zonas de manejo dos SAFs, como na FLO. Assim, coletamos 64 amostras compostas de solo por SAFs com palma de óleo (quatro parcelas x quatro locais de coleta por parcela x quatro camadas por zona de manejo) e, na FLO, 16 amostras compostas (quatro parcelas x quatro camadas por parcela).

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas a 2 mm para a determinação dos atributos químicos do solo. O pH do solo foi determinado em água utilizando-se 10 g de solo na relação de solo e água (1:2,5). O fósforo (P) disponível foi extraído pela solução de Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} e H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) a partir de 10 g de solo e determinado por colorimetria em molibdato de amônio por espectrofotometria (660 nm). Os teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} a partir de 10 g de solo; os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados por espectrometria de absorção atômica e os teores de Al^{3+} foram determinados por titulação em solução de NaOH 0,1 mol L^{-1} . Os teores de potássio (K) trocável foram extraídos com solução Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} e H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) e determinado por fotometria de chama. A acidez potencial (H + Al) foi determinada a partir de extração com acetato de cálcio (0,5 mol L^{-1}) tamponado a pH 7 e quantificada por titulação com solução padronizada de NaOH 0,025 mol L^{-1} . A matéria orgânica do solo (MO) foi quantificada via seca em mufla por incineração. A partir da determinação dos atributos químicos do solo, calculamos os seguintes parâmetros de fertilidade do solo: CTC potencial ($\text{CTC}_{\text{pH } 7}$), CTC efetiva (CTC_e), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%). Todos os procedimentos analíticos e cálculos derivados seguiram Teixeira et al. (2017).

2.2.4 Análise de dados e estatística

Analizamos os atributos químicos do solo de duas formas que consideramos: 1) a camada arável do solo (0-20 cm); e 2) a estratificação das camadas do solo (0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm). A camada arável é aquela tradicionalmente avaliada nas amostragens da fertilidade do solo (Blum et al. 2013; Weber et al. 2021), o que nos permitiu melhor comparação dos nossos dados com a literatura. Geralmente os estudos focam na camada arável porque, de modo geral, nas camadas mais superficiais os efeitos do manejo são mais evidentes. Além disso nessa camada há maior volume de raízes da maioria das plantas cultivadas (Brasil et al. 2020). Também consideramos uma maior estratificação do solo para um melhor entendimento da variação vertical dos atributos químicos do solo.

Para avaliarmos cada atributo da camada arável do solo (0-20 cm), realizamos a ponderação de cada camada (0-5, 5-10 e 10-20 cm) do solo: na camada 0-5 e 5-10 são 5 cm de profundidade, e na 10-20 cm são 10 cm, logo, na soma das camadas foi considerado essa diferença entre as profundidades e dividido por 20.

Para calcular a média de cada atributo por parcela nos sistemas de cultivo de palma de óleo, consideramos a área (%) ocupada por cada zona de manejo: SAF menos biodiverso (coroamento: 25,74%; carreador 24,69%; empilhamento: 11,22% e faixa diversificada: 38,35%); SAF mais biodiverso (coroamento: 21,79%; carreador: 18,92%; empilhamento: 12,54%; faixa diversificada: 46,75%), semelhante ao procedimento adotado em outros estudos sobre palma de óleo (Rahman et al. 2018; Ramos et al. 2018; Gomes et al. 2021). Multiplicamos cada atributo químico pela área ocupada (%) por cada zona em uma parcela, somamos esses resultados e, em seguida, os dividimos por 100. Desse modo obtivemos a média de cada parcela.

Utilizamos análise de variância de um fator (ANOVA) para avaliar os efeitos dos sistemas de cultivo de palma de óleo (SAF-B e SAF-A) e FLO (floresta referência) na camada arável (0-20 cm) e nas camadas ao longo do perfil do solo (0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm) sobre os atributos químicos.

Avaliamos a normalidade dos resíduos, com o teste de Shapiro-Wilk, e a homoscedasticidade, com o teste de Bartlett. Os dados foram transformados quando os pressupostos da análise paramétrica não foram atendidos. Aplicamos o teste Tukey a 5% de probabilidade para a comparação das médias. Todas as análises estatísticas foram executadas usando o software R v.4.0.5 (R Core Team, 2021) aplicando a função `dic` do pacote `ExpDes.pt`.

2.3 Resultados

2.3.1 Atributos químicos do solo na camada arável

Na camada arável do solo (0-20 cm), os atributos de acidez do solo (pH, Al, H+Al) e a saturação por alumínio (m%) foram menores nos solos dos sistemas agroflorestais (SAFs) do que no da floresta (FLO) (Figura 2). Os teores de Ca, Mg, K e P (Figura 3) e a saturação por bases (Figura 4D) variaram da seguinte forma: SAF mais biodiverso (SAF-B) = SAF menos biodiverso (SAF-A) > FLO. A CTC potencial no solo do SAF-B foi igual a do SAF-A e maior que a do FLO; o SAF-A não diferiu da FLO (Figura 4A), sendo SAF-B \geq SAF-A \geq FLO. A CTC efetiva foi maior nos sistemas de cultivos do que na FLO (Figura 4B), sendo SAF-B = SAF-A > FLO. O teor de MO não diferiu entre os sistemas estudados (Figura 4C).

O pH foi cerca de 20% maior nos sistemas de cultivos do que na FLO; o teor de alumínio trocável (Al) e m (%) foram aproximadamente 90% menores nas áreas dos cultivos em comparação a FLO; e H + Al foi 54 e 32% menor no SAF-A e no SAF-B, respectivamente, quando comparados a FLO (Figura 5A).

Os teores de Ca, Mg e K do solo nos cultivos foram aproximadamente 290, 280 e 80% maiores, respectivamente, em relação a FLO. O teor de P foi 630 e 830% maior nos cultivos (SAF-A e SAF-B, respectivamente) do que na FLO (Figura 5B).

A CTC potencial foi 8 e 28% maior no SAF-A e no SAF-B, respectivamente, do que na FLO (Figura 5A). A CTC efetiva foi aproximadamente 150% maior nos cultivos em relação a FLO (Figura 5B). A saturação por bases foi aproximadamente 230 e 180% maior no SAF-A e no SAF-B, respectivamente, em relação a FLO na camada 0-20 cm (Figura 5B)

2.3.2 Variação vertical dos atributos químicos do solo

Nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm ocorreu o mesmo padrão de variação dos atributos de acidez do solo encontrado na camada arável (0-20 cm), ou seja, pH: SAF-A = SAF-B > FLO (Figura 6A) e Al e m (%): SAF-A = SAF-B < FLO (Figura 6B, D). De modo geral, o padrão de variação de H+Al foi FLO > SAF-B > SAF-A (Figura 6C).

Os teores de Ca, Mg e K apresentaram a mesma variação entre sistemas

encontrada na camada arável, ou seja, SAF-A = SAF-B > FLO, exceto o teor de K na camada 5-10 cm (SAF-B > SAF-A > FLO) (Figura 7A, B, C). O teor de P não mostrou um padrão definido de variação entre sistemas: na camada 5-10 cm, o padrão foi igual ao encontrado para os teores de nutrientes na camada 0-20 cm (SAF-A = SAF-B > FLO). No entanto, o padrão de variação do teor de P foi SAF-B > SAF-A > FLO na camada 0-5 cm, SAF-A > SAF-B = FLO na camada 10-20 cm e SAF-A = SAF-B = FLO na camada 20-30 cm (Figura 7D).

A CTC potencial não seguiu um padrão definido entre as camadas: SAF-A = SAF-B > FLO na camada 0-5 cm, SAF-B ≥ SAF-A = FLO na camada 5-10 cm, SAF-B = SAF-A = FLO na camada 10-20 cm e SAF-B ≥ FLO = SAF-A na camada 20-30 cm (Figura 8A). A CTC efetiva seguiu o padrão SAF-A = SAF-B > FLO nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm; na camada 20-30 cm não houve diferença significativa entre os sistemas (Figura 8B). A saturação por bases foi afetada significativamente em todas as camadas do solo (Figura 8D) e seguiu o mesmo padrão encontrado para o pH, Ca, Mg e K, ou seja, SAF-A = SAF-B > FLO. O teor de MO não diferiu entre os sistemas estudados em nenhuma das camadas (Figura 8C).

2.4 Discussão

A menor acidez do solo e saturação por alumínio nos sistemas agroflorestais (SAFs) com palma de óleo é consistente com o reconhecido efeito da calagem na química do solo (Quaggio 2000; Raij 2011), como observado em outros estudos na Amazônia (Chaves et al. 2020; Suárez et al. 2021). A calagem é de suma importância para a correção da acidez dos solos amazônicos, que são caracterizados por elevados teores de Al e H⁺, alta saturação por alumínio e baixa saturação por bases (Fageria and Baligar 2008; Quesada et al. 2011; Mantovanelli et al. 2016). Embora a palma de óleo seja cultivada sob solos naturalmente ácidos, a calagem traz vantagens para cultura. A calagem aumenta a disponibilidade de nutrientes no solo, o que pode favorecer o desempenho da palma de óleo, que é uma cultura altamente exigente em nutrientes (Novais et al. 2007; Corley and Tinker 2016; Brasil et al. 2020). Além disso, a calagem é fonte de Ca, que é o terceiro elemento mais extraído pela colheita da palma de óleo (Matos et al. 2016).

Além da calagem, a adubação orgânica e a deposição de resíduos da poda da palma de óleo, cacau e demais espécies podem ter contribuído para redução dos teores de

Al e H^+ Al. Durante a decomposição da MO, ocorre a associação de H^+ com compostos orgânicos e a formação de hidróxidos de Al, promovendo a liberação da hidroxila e, conseqüentemente, a elevação do pH do solo (Mokolobate and Haynes 2002; Pavinato and Rosolem 2008; Butterly et al. 2013). Portanto, podemos inferir que a deposição contínua de MO sobre o solo em nossos SAFs também podem contribuir para equilibrar o pH do solo.

No nosso estudo, os valores de pH nos SAFs com palma de óleo estavam dentro da faixa de acidez média (5,1-6,0) (Ribeiro et al. 1999), portanto dentro da faixa adequada (5.0-6.0) para esta cultura (Corley and Tinker 2016). O pH do solo da floresta (FLO) estava dentro da faixa de acidez elevada (4,5-5,0) (Ribeiro et al. 1999), o que é consistente com o tipo de solo (Raij et al. 2011) e a ausência de calagem como realizado nos SAFs. O pH do solo é um importante parâmetro a ser avaliado antes da implantação e adubação da palma de óleo. A não correção da acidez do solo pode reduzir a eficiência dos fertilizantes (Franzini et al. 2012), pois para que as cargas negativas do solo sejam ocupadas por nutrientes provenientes dos fertilizantes, é necessário que o H^+ da solução do solo seja neutralizado e o H^+ e Al^{+3} sejam deslocados dos colóides do solo. Logo, sem a correção da acidez do solo, os nutrientes fornecidos podem ser lixiviados e as plantas não serão capazes de utilizá-los, o que pode resultar na diminuição da produção de cachos (Nelson et al. 2011). Assim, o manejo realizado nos SAFs promoveu um status de acidez do solo favorável para a palma de óleo.

O teor de Al foi classificado como baixo nos SAFs com palma de óleo e como médio na FLO (Brasil et al. 2020) e a saturação por alumínio (m%) como muito baixo nos SAFs de palma de óleo e médio na FLO (Ribeiro et al. 1999). Embora os SAFs estudados e a FLO estejam estabelecidos sobre o mesmo tipo de solo que tem predominância de minerais 1:1, óxidos de Fe e Al, devido ao material de origem e elevado intemperismo da região amazônica (Novais et al. 2007; Moreira and Fageria 2009), o manejo realizado nos SAFs como calagem pode ter contribuído para os baixos teores de Al e m (%). Na FLO, a ausência de manejo (correção da acidez do solo) favoreceu os teores mais elevados.

Os maiores teores das bases trocáveis (Ca, Mg e K) e P nos SAFs com palma de óleo podem ser atribuídos à adubação, tanto mineral quanto orgânica, além da calagem realizada nas áreas dos SAFs. Para Ca e Mg, acreditamos a que a elevação dos teores ocorreu por três fatores: (1) adubação mineral com fosfato natural de ARAD (Ca: 37%) e com polissulfato de potássio (Ca: 12% e Mg: 3.5%); (2) adubação com torta de dendê

(Ca: 4% e Mg: 0.01%) e; (3) o efeito benéfico complementar da calagem de adicionar de Ca e Mg. Aumentos nos teores de Ca e Mg foram reportados para sistemas agroflorestais com *T. cacao* sob realização de calagem associada à adubação orgânica na Amazônia colombiana (Suárez et al. 2021). Para os maiores teores de K e P nos solos dos SAFs, sugerimos dois fatores: (1) adubação mineral por meio da aplicação de polissulfato de potássio (14% de K_2O), sulfato de potássio (50% de K_2O), fosfato natural de Arad (10% de P_2O_5), e (2) da adubação orgânica via aplicação da aplicação de torta de dendê (P: 0,56%; K: 0,61%). O empilhamento de folhas podadas de palma de óleo pode ser uma fonte extra de nutrientes, pois as folhas liberam quantidades significativas de K (12,71 g kg^{-1}) e Ca (5,11 g kg^{-1}) (Moradi et al. 2014). Desse modo, além da calagem e adubação, a poda das folhas da palma de óleo também pode ter contribuído para a elevação nos teores de nutrientes no solo por meio do processo de mineralização (Kee and Chew 1997; Furlan Junior 2006) em ambos os SAFs.

Assim como a poda e o empilhamento das folhas da palma de óleo, nos SAFs estudados, o *litterfall* e o material podado das demais espécies foram mantidos sobre o solo. Logo, é possível que essas espécies tenham contribuído para a ciclagem e aporte de nutrientes ao solo. No sistema agroflorestal mais biodiverso (SAF-B), a serrapilheira das espécies *T. cacao*, *Tachigali myrmecophila* Ducke, *Handroanthus albus*, *Carapa guianensis* Aubl e *Spondias mombin* foram as que apresentaram maior aporte de nutrientes (Ca, Mg, K e P) em relação as demais espécies do sistema (Tabela 2). No sistema agroflorestal menos biodiverso (SAF-A), as espécies que mais contribuíram para o aporte de nutrientes foram *G. sepium* e *I. edulis* comparadas as demais espécies presentes no cultivo.

Conforme as classes de disponibilidade de Mg e K no solo descritos no manual de recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará (local do estudo), os teores desses nutrientes se enquadram como médios (Mg) e altos (K) nos SAFs e baixos no solo da FLO (Brasil et al. 2020). O teor de Ca se enquadrou como bom nos SAFs e baixo na FLO (Ribeiro et al. 1999). Logo, sugerimos que, com base nas características do solo da área de estudo, o manejo dos SAFs leva a níveis favoráveis de cátions no solo para o cultivo das culturas plantadas, principalmente, para aquelas cujo potencial é a produção de frutos como: *E. guineensis*, *E. oleracea*, *T. cacao* e *T. grandiflorum*, já que o K é um macronutriente de grande importância na formação de frutos (Shen et al. 2017).

Por outro lado, o teor médio de P no solo está abaixo da faixa de disponibilidade esperada para solos do estado do Pará de acordo com a textura de nossos solos (Brasil et al. 2020), sugerindo que a adubação fosfatada pode ser melhorada para atingir pelo menos níveis médios no solo (9-15mg dm⁻³) nos SAFs, conforme recomendado por Brasil et al. (2020). Problemas relacionados à disponibilidade de P são frequentes em solos tropicais, que apresentam alta fixação de P devido à presença de elevados teores de óxidos de Al e ferro (Fe), reduzindo a disponibilidade de P para as plantas (Gama-Rodrigues et al. 2014). Possivelmente, a diferença no teor de P na primeira camada do solo entre SAF-A e SAF-B se deva a maior quantidade de adubo fosfatado aplicado na SAF-B, pois nesse cultivo as espécies *T. cacao* e *E. oleraceae* foram adubadas com fosfato natural de Arad, contribuindo, portanto, para elevação do teor desse nutriente no solo do sistema.

Os teores dos nutrientes do solo da FLO estão de acordo com o relatado para solos de floresta na Amazônia (Chaves et al. 2020), caracterizados pela baixa fertilidade natural (Moline and Coutinho 2015; Junqueira et al. 2016). Os teores mais elevados de nutrientes nos SAFs podem ser explicados pelo manejo da fertilidade via calagem e adubação, além da contribuição de: *litterfall* e do material proveniente das podas periódicas e dos resíduos das colheitas (principalmente de cacau e palma de óleo), que foram depositado sobre o solo, contribuindo assim para a ciclagem de nutrientes por meio do processo de decomposição (Campanha et al. 2007; Carron et al. 2015; Lehmann and Kleber 2015; Corley and Tinker 2016; Paes et al. 2020; Manorama et al. 2021). Em um consórcio de palma de óleo e cacau na Índia, a adubação com resíduos da palma de óleo (folhas podadas, inflorescências masculinas e cachos improdutivos) elevou o teor de MO e melhorou a fertilidade do solo, sendo apontado como uma alternativa para o cultivo sustentável de palma de óleo (Manorama et al. 2021). Logo, sugerimos que os níveis de fertilidade do solo dos SAFs estão fortemente relacionados ao manejo realizado nessas áreas.

O teor de MO nos solos dos SAFs foi igual ao da FLO, consistente com resultados encontrados por Menezes et al. (2008) em diferentes solos sob sistema agroflorestal na Amazônia brasileira. No nosso estudo, a utilização de práticas de manejo conservacionistas como o não revolvimento do solo (Paes et al. 2020), preparo de área sem queima (Iwata et al. 2012), fertilização orgânica (Boafo et al. 2020), bem como a constante deposição de resíduos vegetais sobre o solo (Bai et al. 2018; Rahman et al. 2020), contribuem para a manutenção da MO (Paes et al., 2020). A deposição contínua

de serapilheira e poda de *T. cacao* no SAF-B e de *G. sepium* no SAF-A podem ter contribuído para a manutenção da MO no solo, sendo uma condição primordial para evitar a diminuição da fertilidade em agroecossistemas (Zhang et al. 2020). Em nosso estudo, o *litterfall* foliar de *T. cacao* ($2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) representou 34% do *litterfall* fino do SAF-B e o *litterfall* foliar de *G. sepium* ($1.80 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) representou 54 % do *litterfall* fino do SAF-A (Saldanha 2018). Logo, nossos resultados sugerem que os SAFs com palma de óleo podem ser uma alternativa com menor impacto sobre a MO do solo, pois apresentaram teores equiparados ao solo da FLO, que sofrem menor interferência antrópica, e consequentemente menor oxidação e perda de MO (Kotowska et al. 2015).

A CTC potencial expressa a quantidade total de cátions trocáveis a pH 7.0 (Lopes and Guilherme 2004). Todos os sistemas avaliados apresentaram valores de CTC potencial ($4,31 - 8,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) classificados como média (Ribeiro et al. 1999). No nosso estudo, o solo do SAF-B apresentou CTC potencial maior do que o da FLO. Acreditamos que o SAF-B apresenta maior CTC potencial em função do maior aporte de MO sobre o solo devido as podas periódicas das espécies, somada à contribuição do *litterfall*, pois ambos podem ter promovido maior aporte de serrapilheira sobre o solo e, por conseguinte, ter aumentado o teor de MO no solo. Nas camadas menos superficiais, a tendência de maiores valores de CTC potencial no SAF-B e FLO em comparação ao SAF-A pode estar relacionada ao sistema radicular das espécies presentes nesses sistemas, que tendem a formar uma rede mais densa, profunda e permanente de raízes (Pimentel et al. 2018), que são a principal fonte de MO nessas camadas. Em solos tropicais, a MO tem um papel fundamental nos aumentos da CTC potencial no solo por promoverem geração de cargas ao solo (Ronquim 2010). Embora não tenhamos quantificado diferenças significativas no teor de MO no solo, possivelmente o aumento na quantidade de cargas negativas nos grupos funcionais carboxílicos e fenólicos em função do processo de decomposição do material vegetal pode ter contribuído para elevar a CTC potencial desses solos (García-Gómez et al. 2005; Xu et al. 2012; Carmo et al. 2016).

A CTC efetiva indica a capacidade do solo em reter cátions próximo ao valor do seu pH natural (Lopes and Guilherme 2004). Os maiores valores de CTC efetiva nos solos dos SAFs em comparação ao da FLO podem estar relacionadas ao efeito da aplicação de calcário dolomítico e da adubação potássica e orgânica nas áreas de SAFs, em contraste com a não aplicação desses insumos na FLO. A CTC efetiva foi classificada como média nos SAFs ($-3 - 4,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e baixa na FLO ($0,81-2,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Ribeiro et al.

1999). Logo, o manejo realizado via calagem influenciou positivamente na elevação da CTC efetiva nos SAFs.

A saturação por bases indica o percentual de participação dos cátions básicos em relação aos cátions ácidos no complexo de troca do solo (Lopes and Guilherme 2004; Novais et al. 2007). Se a maior parte da CTC está ocupada por cátions essenciais como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , pode-se dizer que esse é um solo bom para a nutrição das plantas. Por outro lado, se grande parte da CTC está ocupada por cátions potencialmente tóxicos como H^+ e Al^{3+} , este será um solo de baixa fertilidade (Ronquim, 2010). Em geral, os valores de saturação por base no solo dos SAFs estudados estavam dentro da faixa recomendada (50-60%) para as principais culturas plantadas nestes sistemas (*E. guineensis*, *E. oleracea* Mart., *T. cacao* Linn) (Brasil et al. 2020). Os solos dos SAFs apresentaram maior saturação por bases do que o da FLO possivelmente influenciado pelos resultados de pH, Al e cátions básicos, ocasionados pela ação da calagem e adubação (orgânica e mineral) nas áreas de cultivos. Nossos resultados são consistentes com um estudo que reportou aumento na saturação por bases em função do manejo da calagem e adubação em SAF na Amazônia Oriental (Chaves et al. 2020). Desse modo, podemos inferir que o manejo da fertilidade realizado nos solos dos SAFs é eficiente para a elevação da saturação por bases.

A palma de óleo é considerada uma cultura altamente exigente em nutrientes (Behera et al. 2016; Corley and Tinker 2016), principalmente o K, elemento essencial para a produção de cachos de frutos frescos de palma de óleo (Viégas et al. 2022). Nos sistemas agroflorestais estudados, a produção de cachos frescos de palma de óleo foi semelhante ao dos monocultivos da região ($\sim 15 \text{ Mg ha}^{-1}$) e a produção de amêndoas de cacau (400 kg ha^{-1}) ultrapassou a média da produção dos monocultivos de cacau locais (dados não publicados). Esses resultados sugerem que a diversificação da palma de óleo em sistemas de manejo agroecológico e orgânico tem grande potencial de manter níveis adequados de fertilidade do solo, e, portanto, de atender os critérios de certificação da RSPO.

2.6 Conclusão

A redução na acidez do solo dos sistemas agroflorestais com palma de óleo e a elevação nos teores de nutrientes sugerem que as práticas de manejo adotadas contribuíram para aumentar a fertilidade desses solos em relação à floresta, que apresenta

solo naturalmente ácido e pobre em nutrientes, como é típico na região Amazônica. Os solos dos sistemas agroflorestais sustentaram níveis adequados de nutrientes no solo para o cultivo da palma de óleo nessa região, exceto de P. Em geral, nossos resultados sugerem que o cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais, combinado à adoção de práticas conservacionistas, pode contribuir para a manutenção da fertilidade do solo na Amazônia Oriental.

REFERÊNCIAS

Ahamadou B, Huang Q (2013) Impacts of Agricultural Management Practices on Soil Quality. *Molecular Environmental Soil Science* 429-480. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4177-5_15.

Aholoukpè HNS, Amadji GL, Didier B, Chotte J, Deleporte P, Dubos B, Flori A, Christophe J (2016) Effet de la gestion des feuilles d'élagage du palmier à huile sur le stock de carbone et les propriétés physico-chimiques du sol dans les palmeraies villageoises du Bénin. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 20: 171-182, <https://doi.org/10.25518/1780-4507.12946>.

Albrecht A, Kandji ST (2003) Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99: 15–27. doi:10.1016/S0167-8809(03)00138-5.

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. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104321>.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLdeM, Sparovek, G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 711–728. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.

Bai Z, Caspari T, Gonzalez MR et al (2018) Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 265: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>.

Benami A, Curran LM, Cochrane M, Venturieri A, Franco R, Kneipp J, Swartos A (2018) Oil palm land conversion in Pará, Brazil, from 2006-2014: Evaluating the 2010 Brazilian Sustainable palm oil production program. *Environmental Research Letters* 13: 34-37. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aaa270>.

Besar NA, Suardi H, Phua MH, James D, Mokhtar MB, Ahmed MF (2020) Carbon Stock and Sequestration Potential of an Agroforestry System in Sabah, Malaysia. *Forests* 11: 210. <https://doi.org/10.3390/f11020210>.

Bezerra DA; Silva SASda; Silva RMda; Alves PHCdosS (2018) Avaliação dos atributos químicos do solo em sistemas agroflorestais e pastagem, no município de Brasil Novo-

Pará. Agrarian Academy 5: 83-93.
<https://conhecer.org.br/ojs/index.php/agrarian/article/view/5032>.

Bhagwat SA; Willis KJ (2008) Agroforestry as a solution to the oil-palm debate. *Conservation Biology* 22: 1368-1369. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01026.x>.

Blum SC; Caires EF; Alleoni LRF (2013) Lime and phosphogypsum application and sulfate retention in subtropical soils under no-till system. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13: 279-300. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000024>.

Boafo DK, Kraisornpornson B, Panphon S, Owusu BE, Amanampong PN (2020) Effect of organic soil amendments on soil quality in oil palm production. *Applied Soil Ecology* 147: 103-358. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.008>.

Brasil EB, Cravo MdaS, Viégas IdeJM (2020) Recomendação de calagem e adubação para o estado do Pará. Brasília, DF: Embrapa, p. 419. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/216110/1/LV-RecomendacaoSolo-2020.pdf>.

Brasil EC, Cravo MdaS, Veloso CAC (2020) Amostragem do solo. In: Brasil et al. (2020) Recomendação de calagem e adubação para o estado do Pará. Brasília, DF: Embrapa, p. 47-54. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/216110/1/LV-ecomendacaoSolo-2020.pdf>.

Butterly CR, Baldock JA, Tang C (2013) The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. *Plant and Soil* 366: 366-198. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1422-1>.

Campanha MM, Santos RHS, Freitas GBde, Martinez EP, Jaramillo-Botero C, Garcia SL (2007) Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na zona da mata MG. *Revista Árvore* 31: 805-812. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000500004>.

Carmo DL, Lima LB, Silva CA (2016) Soil Fertility and Electrical Conductivity Affected by Organic Waste Rates and Nutrient Inputs. *Rev Bras Cienc Solo* 40. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150152>

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. <https://doi.org/10.1071/SR14249>.

Carvalho WR, Vasconcelos SS, Kato OR, Capela CJB, Castellani DC (2014) Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. *Agroforestry Systems* 88: 357-368. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9689-2>.

Corley RHV, Tinker PB (2016) *The Oil Palm*, 5 th edn. World Agriculture Serie. 674 p.

Chaves S. F da S, Gama MAP, Alves RM, Oliveira RPde, Pedroza Neto JL, Lima VMN (2020) Evaluation of physicochemical attributes of a yellow latosol under agroforestry system as compared to secondary forest in the Eastern Amazon. *Agroforestry Systems* 94: 1903-1912. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00513-6>.

Dhandapani S, Girkin NT, Evers S, Ritz K, Sjögersten S (2020) Is intercropping an environmentally-wise alternative to established oil palm monoculture in tropical peatlands? *Frontiers in Forests and Global Change* 3: 1-8. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00070>.

EMBRAPA (2016). Mapas de solos e de aptidão agrícola de áreas alteradas do Pará. Embrapa Amazônia Oriental, p.19.

Fageria NK, Baligar VC (2008) Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. *Advances in Agronomy* 99: 346-389. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)00407-0.

Fairhurst TH; Hardter R (2012) Palma de aceite: Manejo para rendimentos altos y sostenibles. International Plant Nutrition Institute (IPNI), y el International Potash Institute (IPI). p.404.

Fitzherbert EB, Struebig MJ, Morel A, Danielsen F, Brühl CA, Donald PF, Phalan B (2008) How will oil palm expansion affect biodiversity? *Trends in Ecology and Evolution*. 23: 538–545. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.06.012>.

Fonte SJ, Barrios E, Six J (2010) Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma* 155: 320–328. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.016>.

Formaglio G, Veldkamp E, Muhammad D, Tjoa A, Corre MD (2021) Mulching with pruned fronds promotes the internal soil N cycling and soil fertility in a large-scale oil palm plantation. *Biogeochemistry* 154: 63-80. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00798-4>.

Franzini VI, Souza MB, Gomes Junior RA, Silva ARB, Rodrigues ECF (2017) Fertilidade do Solo, Nutrição e Desenvolvimento Vegetativo da Palma de Óleo Consorciada com Culturas Alimentares. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 29 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 119).

Franzini VI, Matos GSB, Machado DN, Assunção EA, Viégas, IJM, Botelho, SM (2020) Palma de óleo (Dendezeiro). *In* Brasil, EB, Cravo MS, VIÉGAS, IJM. Recomendação de calagem e adubação para o estado do Pará. Embrapa, Brasília, 419 p.

Franzini VI, Silva ARB, Gomes Junior RA (2012) Acidez do solo e sua correção em palma de óleo. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 37 p.

Freitas ICde; Santos FCVdos; Custódio Filho RdoO; Correchel V; Silva RBda (2012) Agroecossistemas de produção familiar da Amazônia e seus impactos nos atributos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17: 1310-1317. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200009>.

Freitas PLde, Ramalho Filho A, Motta PEFda, Teixeira WG (2010) Planejamento conservacionista e procedimentos para a instalação de palmares na Amazônia. *In*: Ramalho Filho et al. (2010) Zoneamento Agroecológico, Produção e Manejo para a Cultura da Palma de Óleo na Amazônia. Embrapa Solos, Rio de Janeiro – RJ, p. 73-80. <https://www.researchgate.net/publication/258915590>.

Furlan Junior, J (2006) Dendê: manejo e uso dos subprodutos e dos resíduos. Embrapa Amazônia Oriental, Pará

Gama-Rodrigues C, Sales MVS, Silva PSD, Comerford NB, Cropper WP, Gama-Rodrigues EF (2014) An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry* 118: 453–469. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9946-x>.

Gomes MF; Vasconcelos SS; Viana-Junior AB; Costa ANM; Barros PC; Kato OR; Castellani DC (2021) Oil palm agroforestry shows higher soil permanganate oxidizable carbon than monoculture plantations in Eastern Amazonia. *Land Degradation & Development* 32: 4313-4326. <https://doi.org/10.1002/ldr.4038>.

Gomes Junior RA; VenturieriA; Boari A; Homma AKO (2010) Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar. Embrapa Amazônia Oriental, p.190. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/869365>.

García-Gómez A, Bernal MP, Roig A (2005) Organic Matter Fractions Involved in Degradation and Humification Processes During Composting. *Compost Science & Utilization* 13: 127–135

Hansen SB, Padfield R, Syayuti K, Evers S, Zakariah Z, Mastura S (2015) Trends in Global Palm Oil Sustainability. *Research, Journal of Cleaner Production* 100: 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.051>.

Iwata B. de F, Leite LFC, Araújo ASF, Nunes LAPL, Genhing C, Campos LP (2012) Agroforestry systems and its effects on chemical attributes of an Ultisol in the “Cerrado” of Piauí State, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16: 730–738. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700005>.

Junqueira AB, Souza NB, Stomph TJ, Almekinders CJM, Clement CR, Struik PC (2016) Soil fertility gradients shape the agrobiodiversity of Amazonian homegardens. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 221: 270-281. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.002>.

Junqueira A, Schlindwein M, Canuto J, Nobre H, Souza T (2013) Sistemas agroflorestais e mudanças na qualidade do solo em assentamento de reforma agrária. *Revista Brasileira de Agroecologia* 8: 102–115. <https://revistas.aba-agroecologia.org.br/rbagroecologia/article/view/12808>.

Kee KK; Chew PS (1997) Nutrients recycled from pruned fronds in mature oil palm (*Elais guineensis* Jacq.). *In*: Ando T et al. (eds) *Plant Nutrition for Sustainable Food*

Production and Environment. *Developments in Plant and Soil Sciences* 78: 601-602. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0047-9_192.

Khasanah N, Noordwijk van M, Slingerland M, Sofiyudin M, Stomph D, Migeon AF, Hairiah K (2020) Oil Palm Agroforestry Can Achieve Economic and Environmental Gains as Indicated by Multifunctional Land Equivalent Ratios. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 3: 122. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00122>.

Kotowska, M. M., Leuschner, C., Triadiati, T., Meriem, S., & Hertel, D. (2015). Quantifying above- and belowground biomass carbon loss with forest conversion in tropical lowlands of Sumatra (Indonesia). *Global Change Biology*, 21, 3620–3634. <https://doi.org/10.1111/gcb.12979>

Kurnia J C, Jangam SV, Akhatar S, Sasmito AP, Mujumdar AS (2016) Advances in biofuel production from oil palm and palm oil processing wastes: A review. *Biofuel Research Journal* 9: 332-346. <https://dx.doi.org/10.18331/BRJ2016.3.1.3>.

Lehmann J, Kleber M (2015) The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528: 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>.

Lopes AS, Guilherme LRG (2004) Interpretação de análise de solo: Conceitos e aplicações. Minas Gerais, MG: ANDA p.50. https://www.agrolink.com.br/downloads/interpretacao_de_analise%20de_solo_conceitos_e_aplicacoes.pdf

Luke SH, Advento AD, Aryawan AK et al (2019) Managing oil palm plantations more sustainably: large-scale experiments within the Biodiversity and Ecosystem Function in Tropical Agriculture (BEFTA) Programme. *Frontiers in Forest and Global Change* 75: 1-27. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00075>.

Maia R da S, Vasconcelos SS, Viana-Junior AB, Castellani DC, Kato OR (2021) Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. *Agroforestry Systems* 95: 731-740. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00627-5>.

Manorama K, Behera SK, Suresh K, Prasad MV, Mathur RK, Harinaryana P (2021) Mulching and technological interventions avoid land degradation in intensive oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) production system. *Land Degradation & Development* 32: 3785-3797. <https://doi.org/10.1002/ldr.3886>.

Mantovanelli BC, Alho LC, Franciscon U, Nascimento F (2016) Distribuição espacial dos componentes da acidez do solo em área de campo natural na região de Humaitá, Amazonas. *Revista de Ciências Agroambientais* 14: 1-9. <https://doi.org/10.5327/rcaa.v14i1.817>.

Matos GSBde; Fernandes AR, Wadt GS (2016) Níveis críticos e faixas de suficiência de nutrientes derivados de métodos de avaliação do estado nutricional da palma-de-óleo.

Pesquisa agropecuária Brasileira 51:1557-1567. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900055.

Menezes JMT, Leeuwen van J, Valeri SV, Cruz MCPda, Leandro RC (2008) Comparação entre solos sob uso agroflorestal e em florestas remanescentes adjacentes, no norte de Rondônia. Revista Brasileira de Ciência do Solo 32: 893–898. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200043>.

Mokolobate MS, Haynes RJ (2002) Comparative liming effect of four organic residues Applied to an acid soil. Biology and Fertility of Soils 35: 79-85. <https://doi.org/10.1007/s00374-001-0439-z>.

Moline EFdaV, Coutinho ELM (2015) Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences 58: 14-20. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1683>.

Moreira A, Fageria NK (2009) Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 40: 2912–2925. <https://doi.org/10.1080/00103620903175371>.

Moradi A, Teh CBS, Goh KJ, Husni MHA, Ishak CF (2014) Decomposition and nutrient release temporal pattern of oil palm residues. Annals of Applied Biology 164: 208–219. <https://doi.org/10.1111/aab.12094>.

Nair PKR (1993) An Introduction to Agroforestry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p 499.

Nelson PN, Banabas M; Goodrick I, Webb MJ, Huth NI, O'grady D (2015) Soil sampling in oil palm plantations: a practical design that accounts for lateral variability at the tree scale. Plant and Soil 394: 421–429. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-015-2490-9>.

Nelson PN, Rhebergen T, Berthelsen S, Webb MJ, Banabas M, Oberthür T, Donough CR, Indrasuara K, Lubis A (2011). Soil Acidification under Oil Palm : Rates and Effects on Yield. Better Crops 95: 22-25. <https://researchonline.jcu.edu.au/19362>.

Niether W; Shneidewind U; Fuchs M; Schneider M; Armengot L (2019) Below-and aboveground production in cocoa monocultures and agroforestry systems. Science of the Total Environment 657: 558-567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.050>.

Novais RF, Alvarez VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB Neves JC (2007). Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 1: 10-17.

Pacheco NA, Bastos TX (2008) Boletim agrometeorológico 2006: Tomé-Açu, PA. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. p. 30.

Paes EdeC, Dias FPM, Fernandes IO, Pereira EG, Lima JM, Alcoforado PAUG, Nóbrega JCA (2020) Different Soil Management Systems Promote Improvements in Nutrient Content and Litter Input. Journal of Sustainable Forestry 40: 528-538. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1788953>.

Pavinato PS, Rosolem CA (2008) Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 911-920. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300001>.

Pezarico CR, Vitorino ACT, Mercante FM, Daniel O (2013) Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. *Revista de Ciências Agrárias* 56: 40-47. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.004>.

Pimentel CR; Carvalho CSS; Pauletto D; Lopes LSdeS; Rode F (2018) Crescimento e sobrevivência de espécies arbóreas em sistema agroflorestal experimental em Santarém, Pará. *Agrossistemas* 10: 195-208. <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v10i2.5203>.

Quaggio JA (2000) Acidez e calagem em solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico. p.111.

Quesada CA; Lloyd J; Anderson LO; Fyllas NM; Schwarz M; Czimczik CI (2011) Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences* 8: 1415–1440. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>.

Rahman N, Giller KE, Neergaard Ade, Magid J, Gerrie WJ van deV, Bruun TB (2021) The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. *Journal of Environmental Management* 278: 111446. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111446>.

Rahman N; Bruun TB; Giller KE; Magid J; Van de vem GWJ; Neergaard Ade (2018) Soil greenhouse gas emissions from inorganic fertilizers and recycled oil palm waste products from Indonesian oil palm plantations. *GCB Bioenergy* 11: 1056-1074. DOI: 10.1111/gcbb.12618.

Raij Bvan (2011). *Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes*. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, p.420.

Ramalho-Filho A, Motta EF, Freitas PL, Teixeira WG (2010) Zoneamento Agroecológico, Produção e Manejo para a Cultura da Palma de Óleo na Amazônia. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p.

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. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0131-4>.

R CORE TEAM (2021) R: language and enviromental for statistical computing . R 720 Foudation for Sstatistical Computing: Viena, Austria.

Ribeiro AC, Guimaraes PTG, Alvarez VH (1999) Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Comissão de Fertilidade do solo do estado de Minas Gerais – Viçosa MG, p. 359.

Rodrigues TE, Santos PLdos, Rollim PAM, Santos E, Rego RS, Silva JMLda, Valente MA, Gama JRN (2001) Caracterização e classificação dos solos do Município de Tomé-Açu, PA. Embrapa Amazonia Oriental, p.49.

Ronquim CC (2010) Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas SP: Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8 p. 26.
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>

ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE PALM OIL (2013). Principles and Criteria for Sustainable Palm Oil Production. Available online at: <https://rspo.org/keydocuments/certification/rspo-principles-and-criteria>.

Rüegg, J; Quezada JC; Santonja M; Ghazoul J (2018) Drivers of soil carbon stabilization in oil palm plantations. *Land Degradation & Development* 1: 1-12.
<http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3380>.

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (eds) (2017) Manual de Métodos de Análise de Solo. Embrapa, Brasília

Saldanha VN (2018) Aporte de serapilheira em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. Dissertation, Universidade Federal Rural da Amazônia

Shen C; Wang J; Jin X; Liu N; Fan x; Dong C; Shen Q; Xu Y (2017) Potassium enhances the sugar assimilation in leaves and fruit by regulating the expression of key genes involved in sugar metabolism of Asian pears. *Plant Growth Regulation* 83:287–300. DOI 10.1007/s10725-017-0294-z.

Silva CS da, Mendonça BAF de, Pereira MG, Araújo EJG de, Castellani DC (2018) Spatial dependency and correlation of properties of soil cultivated with oil palm, *Elaeis guineensis*, in agroforestry systems in the eastern Brazilian Amazon. *Acta Amazonica* 48: 280-289. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201704423>.

Somarriba, E (1992) Revesting the past: na essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems* 19: 233-240 <https://doi.org/10.1007/BF00118781>.

Suárez LR, Salazar JCS, Casanoves F, Bieng MAN (2021) 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* 314: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107349>.

Sulaiman F; Abdullah N; Gerhauser H; Shariff A (2011) An outlook of Malaysian energy, oil palm industry and its utilization of wastes as useful resources. *Biomass and Bioenergy* 35: 3775-3786. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.018>.

Tayleur C, Balmford A, Buchanan GM et al (2018). Where are commodity crops certified, and what does it mean for conservation and poverty alleviation? *Biological Conservation* 217: 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.024>.

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (eds) (2017) Manual de Métodos de Análise de Solo. Embrapa, Brasília.

Teuscher M, Gérard A, Brose U (2016) Experimental Biodiversity Enrichment in Oil-Palm-Dominated Landscapes in Indonesia. *Frontiers in Plant Science* 7: 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01538>.

Veloso et al (2020) Correção da acidez do solo. *In* Brasil E B, Cravo, M da S, Viégas, I de J M. Recomendação de calagem e adubação para o estado do Pará. Embrapa, Brasília

Viégas I, Padilha W, da Leite R, et al (2022) Phosphate, potassium and magnesium fertilization on oil palm productivity: 12 years of monitoring in the Brazilian Amazon. *Journal of Plant Nutrition* 45: 2189-2201.

Viégas IJM, Pimentel MJO, Galvão JR, Silva DAS, Ferreira EVO, Silva Júnior ML, Yakuwa TKM, Lima SKS (2019) Adubação mineral na fase produtiva da palma óleo (*Elaeis guineenses* Jacq) cultivado na região Amazônica. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* 10: 274-286. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0024>.

Weber LK; Cavaliere-Polizeli KMV; Zimmermann GG; Filho OG; Tormena C; Jasper SP (2021) Impact of Self-Propelled Sprayer Trafc on Ferralsol Physical Properties in Southern Brazil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21: 2957-2966. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00581-2>.

Xu R, Zhao A, Yuan J, Jiang J (2012) pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. *J Soils Sediments* 12:494– <https://doi.org/502.10.1007/s11368-012-0483-3>

Young A (1997) *Agroforestry for soil management*, 2nd ed. Nairobi: CAB International, p.320.

Yusuin Y; Tan NP; Keng WM; Abdu A (2015) Nutrient Status of Frond Heaps and the Underlying Soils at An 18 – Year-Old Oil Palm Field in Central Pahang, Malaysia. *Tropical Agriculture and Development* 59: 212-220. <http://dx.doi.org/10.11248/jsta.59.212>.

Zhang H; Niu L an; Hu K; Hao J; Li F; Gao Z; Wang X (2020) Influence of tillage, straw-returning and mineral fertilization on the stability and associated organic content of soil aggregates in the north China plain. *Agronomy* 10: 901. doi:10.3390/agronomy10070951.

Tabela 1- Granulometria do solo das áreas de estudo SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Sistemas	Areia	Silte	Argila
	g kg ⁻¹		
	Camada 0 - 5 cm		
SAF - A	693	187	120
SAF - B	724	136	140
FLO	779	102	120
	Camada 5 - 10 cm		
SAF - A	704	97	200
SAF - B	673	127	200
FLO	719	122	160
	Camada 10 - 20 cm		
SAF - A	623	137	240
SAF - B	573	148	280
FLO	579	181	240
	Camada 20 - 30 cm		
SAF - A	535	145	320
SAF - B	518	103	380
FLO	461	159	380

Tabela 2 - Aporte de nutrientes por espécies plantadas em sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF menos biodiverso (SAF-A) e SAF mais biodiverso (SAF-B) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Sistemas	Espécies	Ca	Mg	K	P
SAF - A	<i>Gliricidia sepium</i>	41.21	7.90	5.16	3.61
	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	0.70	0.10	0.10	0.10
	<i>Inga edulis</i>	27.36	3.33	2.40	1.40
	<i>Pueraria phaseoloides</i>	1.84	0.30	0.20	0.20
	<i>Euterpe oleracea</i> Mart.	0.44	0.10	0.10	0.10
	<i>Tithonia diversifolia</i>	0.18	0.04	0.02	0.02
	Outras espécies	0.46	0.15	0.14	0.08
	Material reprodutivo	0.62	0.10	0.08	0.07
	Pecíolo	8.76	1.14	1.80	0.72
	Miscelânea	5.40	0.84	0.52	0.48
SAF - B	<i>Theobroma cacao</i> Linn	29.25	12.17	9.20	1.68
	<i>Tachigali myrmecophila</i> Ducke	10.45	2.25	3.40	2.25
	<i>Handroanthus albus</i>	20.06	4.37	3.84	1.43
	<i>Euterpe oleracea</i> Mart	7.56	1.27	1.29	1.26
	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	1.39	0.35	0.26	0.09
	<i>Carapa guianensis</i> Aubl	15.16	3.71	3.40	0.85
	<i>Caesalpinia echinata</i>	2.14	0.16	0.13	0.06
	<i>Inga edulis</i>	0.36	0,07	0.04	0.02
	<i>Spondias mombin</i>	15.80	1.58	1.89	0.95
	Acacia mangium	0.46	6.30	0.39	0.32
	<i>Swietenia macrophylla</i> King	2.14	0.44	0.82	0.14
	<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D.Don	0.32	1.79	0.64	0.13
	<i>Hymenaea courbaril</i>	0.13	0.02	0.04	0.03
	* <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	-	-	-	-
	* <i>Mangifera indica</i> L.	-	-	-	-
	* <i>Theobroma grandiflorum</i> (Wild. Ex Spreng)	-	-	-	-
	Outras espécies	2.27	0.47	0.58	0.22
	Material reprodutivo	6.69	2.71	2.82	0.57
	Pecíolo	13.98	3.42	4.37	1.06
	Miscelânea	1.18	5.18	1.49	0.46

*Não houve material suficiente para quantificar o aporte de nutrientes no *litterfall* dessas espécies.

Fonte: Saldanha 2018 (dados não publicados)

Tabela 3 - Histórico de adubação e correção da acidez do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Calcário / fertilizante	Unidade	Área de Coroamento											Faixa diversificada			
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2008	2017	2018	
Calcário dolomítico ^d	kg ha ⁻¹											1716		1300 ^b		
Fosfato natural de ARAD ^e	kg planta ⁻¹	0,3		1	1,5							0,7	2,5	0,3 ^a	0,6 ^a /0,7 ^c	0,6 ^a /0,9 ^c
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 /2,5 ^c		
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							
Produbor 10 ^p	kg planta ⁻¹										0,1	0,15	0,1 ^c	0,10 ^a		
Polissulfato de potássio ^q	kg planta ⁻¹										2,6	4,50		0,175 ^a /0,70 ^c		
Sulfato de potássio ^r	kg planta ⁻¹	40					0,8	0,8	0,4	1,8		1,00		0,1 ^a /0,3 ^c	0,15 ^a /0,5 ^c	

^a *Theobroma cacao*^j N: 2,4%; P: 0,56%; K: 0,61%; Mg: 0,01%; Ca: 4%; S: 0,4%; Zn: 0,01%; B: 0,05%

^b Aplicado por toda a faixa diversificada

^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%

^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

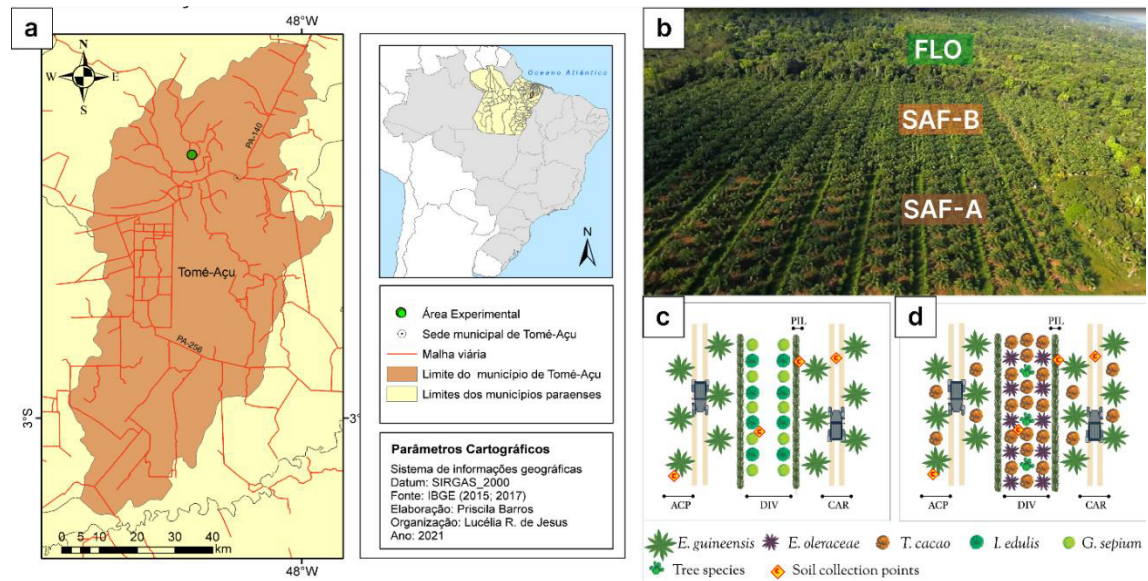


Figura 1 - Localização da (a) área experimental contendo (b) dois sistemas agroflorestais com palma de óleo — SAF menos biodiverso (SAF-A) e SAF mais biodiverso (SAF-B) — e uma floresta secundária (FLO) no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental. Em (c, SAF-A) e (d, SAF-B), as siglas representam as zonas de manejo onde o solo foi amostrado: coroamento (ACP), carreador (CAR), empilhamento (PIL) e faixa diversificada (DIV).

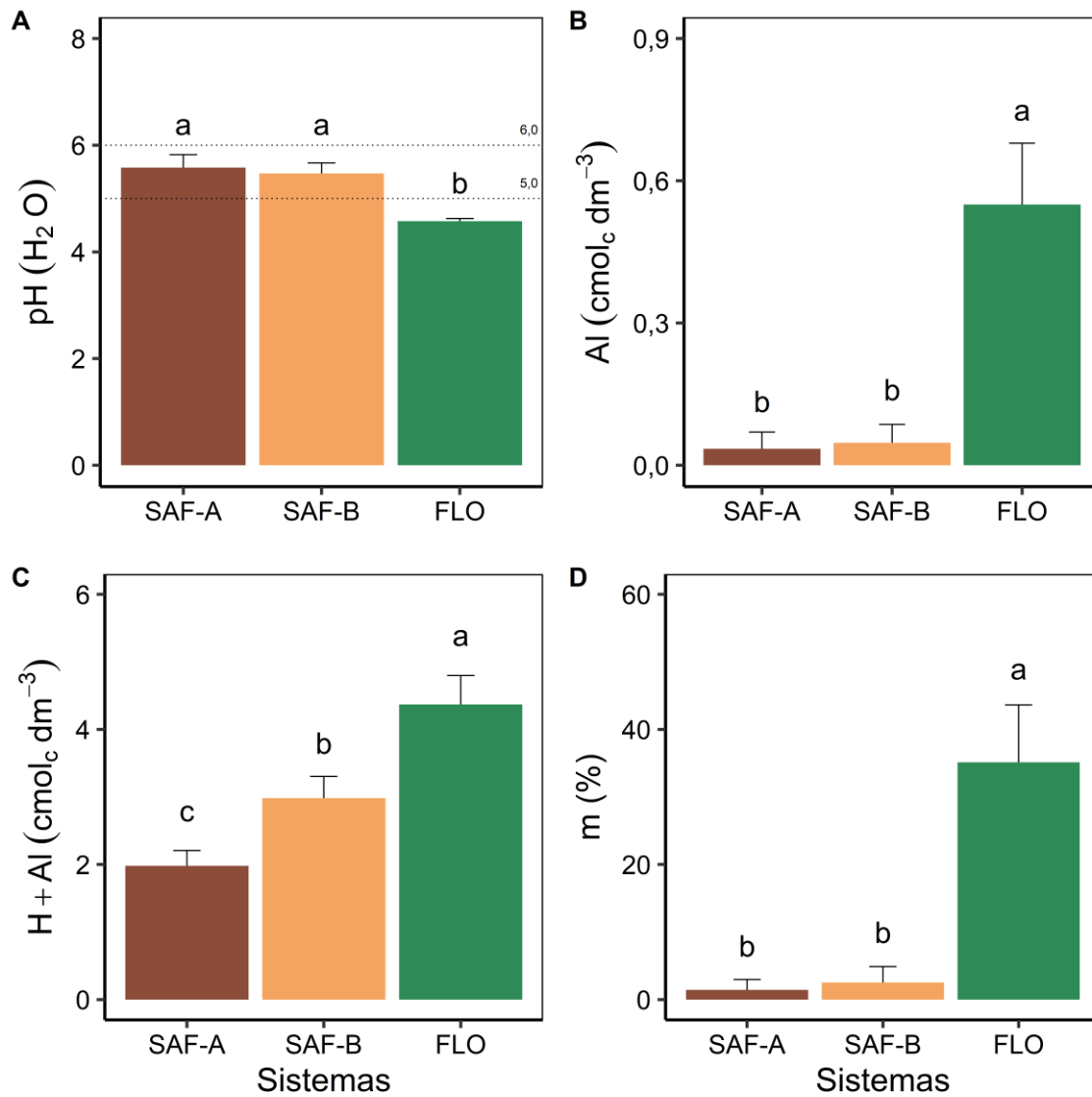


Figura 2 - Valores médios de pH do solo, alumínio trocável (Al), acidez potencial (H + Al) e saturação por Al (m) na camada 0-20 cm do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo — SAF menos biodiverso (SAF-A) e SAF mais biodiverso (SAF-B) — e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. As barras correspondem a média \pm desvio padrão (n = 4). Letras minúsculas indicam diferenças significativas entre sistemas (Tukey, $p < 0,05$). As linhas tracejadas em (a) delimitam a faixa de classificação de acidez ativa no solo dos sistemas conforme o manual de interpretação dos resultados da análise do solo.

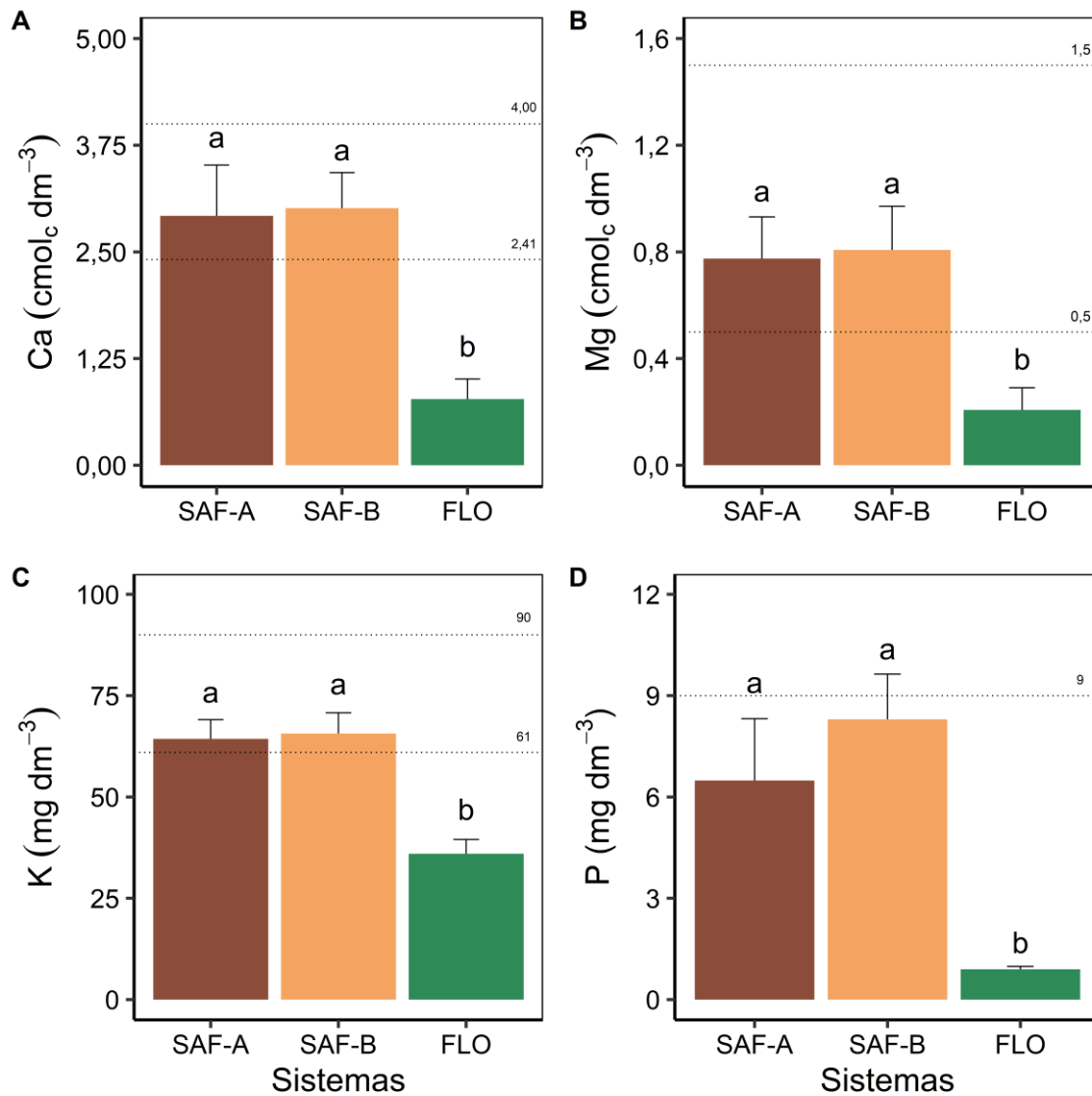


Figura 3 - Teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P) na camada 0-20 cm do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo — SAF menos biodiverso (SAF-A) e SAF mais biodiverso (SAF-B) — e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. As barras correspondem a média \pm desvio padrão ($n = 4$). Letras minúsculas indicam diferenças significativas entre sistemas (Tukey, $p < 0,05$). As linhas tracejadas representam a faixa de classificação de disponibilidade dos nutrientes no solo dos sistemas conforme o manual de interpretação dos resultados da análise do solo.

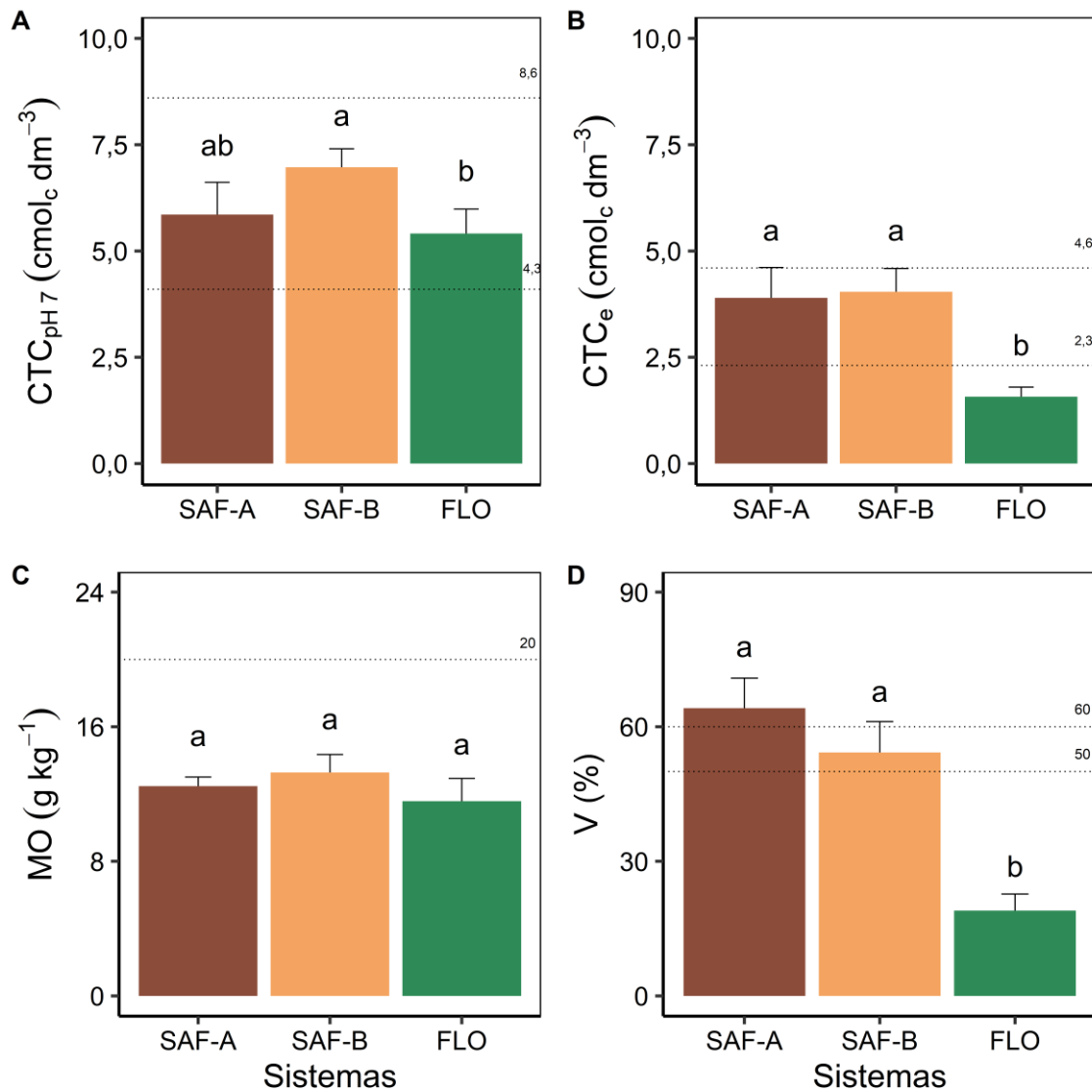


Figura 4 - Capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH 7}), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V%) na camada 0-20 cm dos em sistemas agroflorestais com palma de óleo — SAF menos biodiverso (SAF-A) e SAF mais biodiverso (SAF-B) — e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil. As barras correspondem a média ± desvio padrão (n = 4). Letras minúsculas indicam diferenças significativas entre sistemas (Tukey, p < 0.05). As linhas tracejadas representam a faixa de classificação desses atributos encontrados nos solos dos sistemas conforme o manual de interpretação dos resultados da análise do solo.

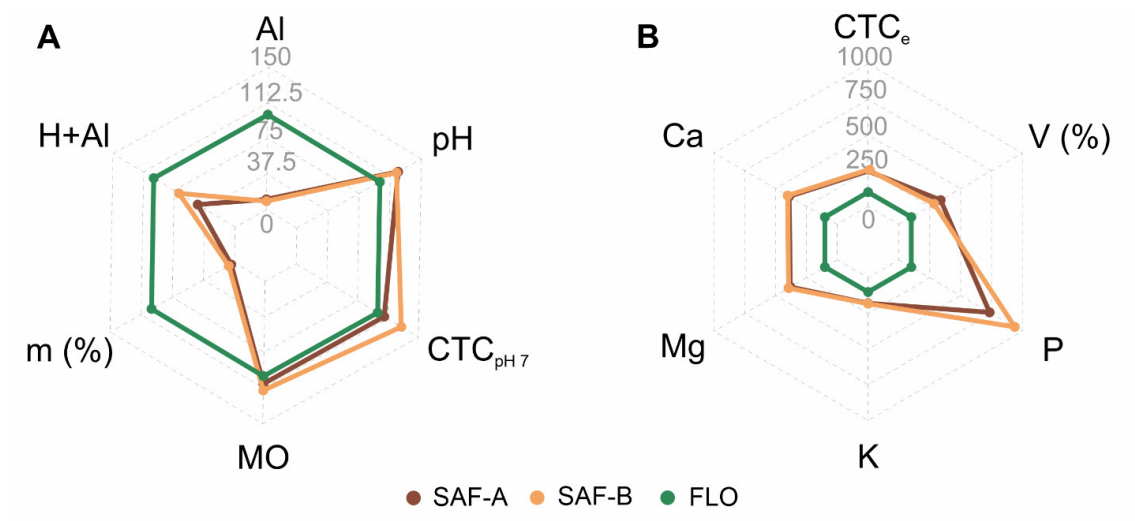


Figura 5 - Variação percentual dos atributos químicos do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo — SAF menos biodiverso (SAF-A), SAF mais biodiverso (SAF-B) — em relação à floresta (FLO). A linha em vermelho representa o valor encontrado no solo da floresta e corresponde a 100%.

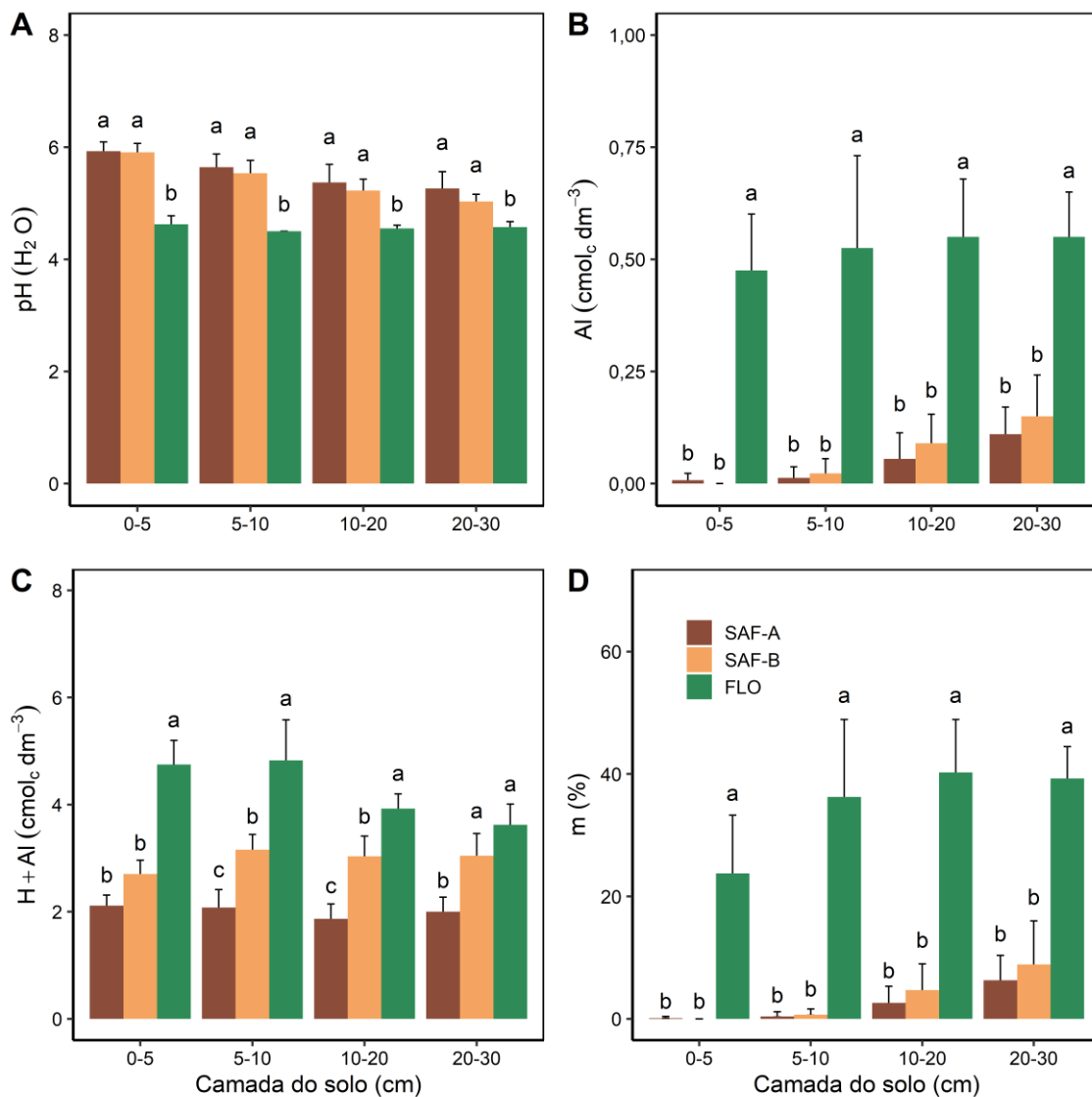


Figura 6 - Valores médios do pH do solo, alumínio trocável (Al), acidez potencial (H + Al) e saturação por Al (m%) em diferentes camadas do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo — SAF menos biodiverso (SAF-A) e SAF mais biodiverso (SAF-B) — e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. As barras correspondem a média \pm desvio padrão ($n = 4$). Letras minúsculas indicam diferenças significativas entre sistemas em cada camada do solo (Tukey, $p < 0,05$).

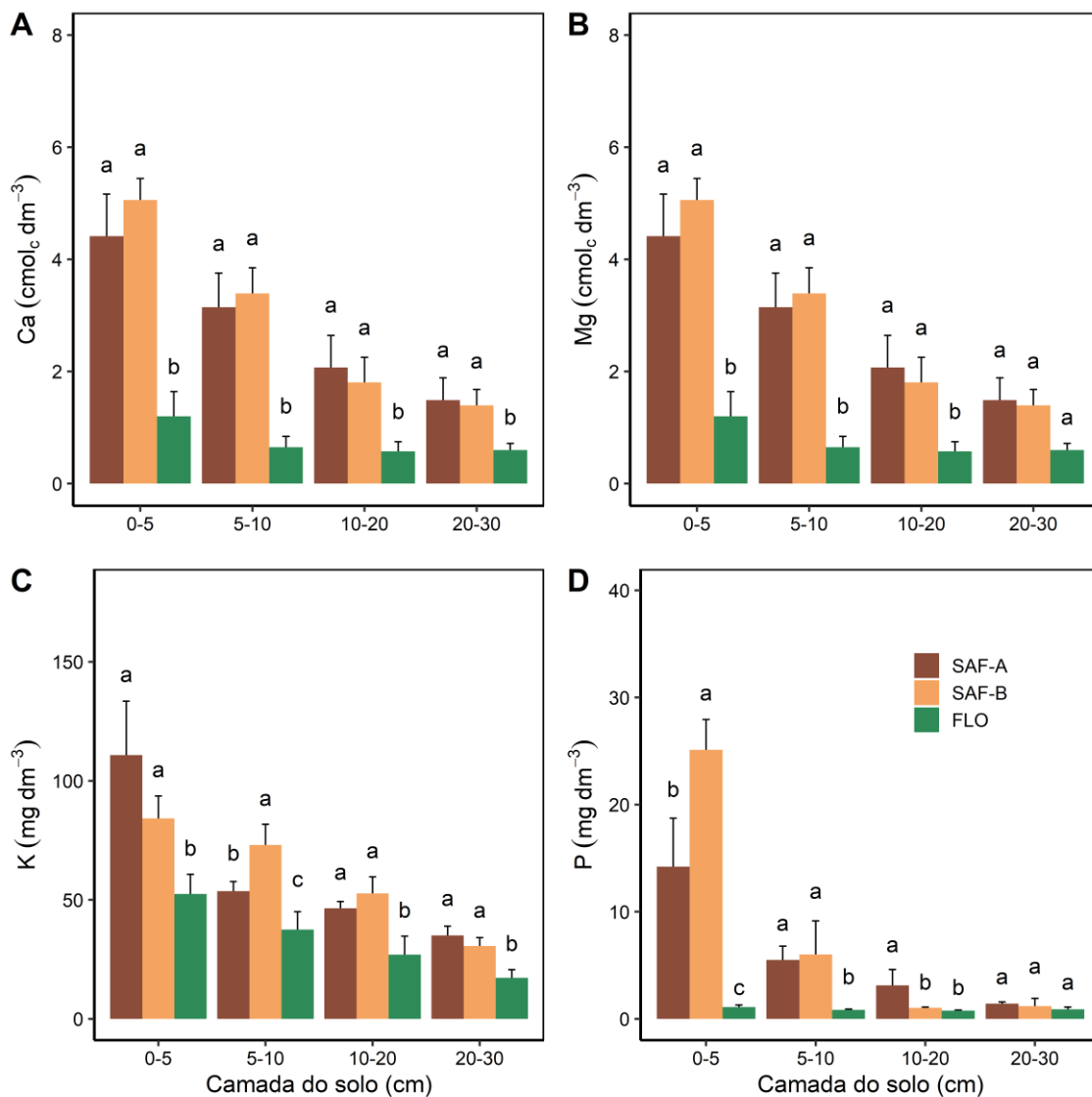


Figura 7 - Teor de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P) em diferentes camadas do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo — SAF menos biodiverso (SAF-A) e SAF mais biodiverso (SAF-B) — e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. As barras correspondem a média \pm desvio padrão ($n = 4$). Letras minúsculas indicam diferenças significativas entre sistemas em cada camada do solo (Tukey, $p < 0,05$).

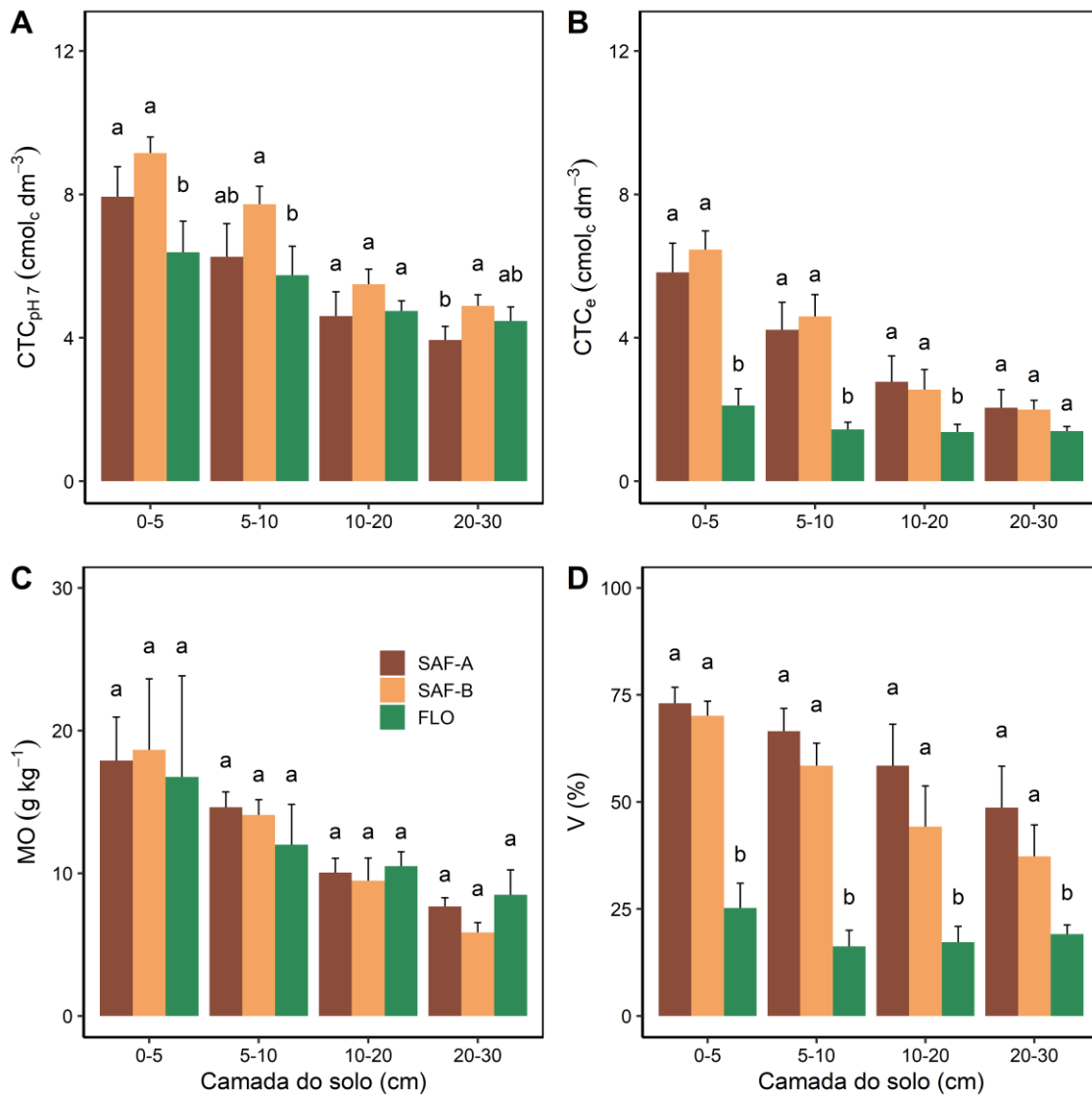


Figura 8 - Capacidade de troca de cátions potencial ($CTC_{pH\ 7}$), Capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), matéria orgânica (MO) e saturação por bases ($V\%$) em diferentes camadas do solo sob sistemas agroflorestais com palma de óleo — SAF menos biodiverso (SAF-A) e SAF mais biodiverso (SAF-B) — e floresta (FLO) em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. As barras correspondem a média \pm desvio padrão ($n = 4$). Letras minúsculas indicam diferenças significativas entre sistemas em cada camada do solo (Tukey, $p < 0,05$).

3 VARIAÇÃO ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

A fertilidade do solo é influenciada por diferentes práticas de manejo. O manejo típico do monocultivo de palma de óleo cria zonas que podem apresentar distinta variação horizontal da fertilidade do solo. Contudo, a variação da fertilidade do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo, sugeridos como alternativas sustentáveis ao monocultivo, não é bem conhecida. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar se os parâmetros de fertilidade do solo variam em função das zonas de manejo em sistemas agroflorestais com palma de óleo. O estudo foi realizado em Sítios com sistemas agroflorestais localizados no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental. Coletamos amostras de solos em quatro zonas de manejo no sistema agroflorestal, denominadas: área de coroamento da palma de óleo (ACP), empilhamento das folhas (PIL), faixa diversificada (DIV) e carreador (CAR), nas camadas 0-5; 5-10; 10-20 e 20-30 cm do solo, além dessas camadas na ACP e DIV também foram coletadas amostras de 30-50, 50-70 e 70-100 cm do solo para ACP e DIV. Avaliamos os seguintes atributos químicos de fertilidade do solo: potencial hidrogeniônico (pH), teor de alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), capacidade de troca de cátions potencial ($CTC_{pH\ 7}$), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), acidez potencial (H+Al), matéria orgânica (MO), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%). Em geral, as zonas ACP, PIL e DIV apresentaram os maiores níveis de fertilidade no solo comparadas ao CAR, que apresentou os menores níveis de fertilidade. Provavelmente, os maiores níveis de fertilidade em ACP e DIV são causados pelo manejo da adubação orgânica e mineral; na zona PIL pode ser causada pelo empilhamento e manutenção das folhas de palma de óleo. Assim, a manutenção da MO sobre o solo dos SAFs, aliado ao manejo da adubação pode contribuir para elevar os níveis de fertilidade do solo.

Palavras-chave: Zonas de manejo. Práticas de manejo. Matéria orgânica. Sistemas sustentáveis. Amazônia brasileira

ABSTRACT

Soil fertility is influenced by different management practices. The typical management of oil palm monoculture creates zones that may present distinct horizontal variation of soil fertility. However, the variation of soil fertility in agroforestry systems with oil palm, suggested as sustainable alternatives to monoculture, is not well known. Therefore, the objective of this study was to evaluate whether soil fertility parameters vary according to management zones in agroforestry systems with oil palm. The study was conducted in sites with agroforestry systems located in the municipality of Tomé-Açu, Eastern Amazon. We collected soil samples in four management zones in the agroforestry system, called: palm oil crowning area (PCA), leaf stacking (PIL), diversified range (DIV) and carrier (CAR), in layers 0-5; 5-10; 10-20 and 20-30 cm of the soil, in addition to these layers in the ACP and DIV were also collected samples of 30-50, 50-70 and 70-100 cm of soil for ACP and DIV. We evaluated the following chemical attributes of soil fertility: hydrogen potential (pH), aluminum content (Al), calcium (Ca), magnesium (Mg), phosphorus (P), potassium (K), potential cation exchange capacity (CTC_{pH 7}), effective cation exchange capacity (CTC_e), potential acidity (H+Al), organic matter (OM), aluminum saturation (m%) and base saturation (V%). In general, the ACP, PIL and DIV zones presented the highest levels of fertility in the soil compared to CAR, which presented the lowest fertility levels. Probably, the highest fertility levels in ACP and DIV are caused by the management of organic and mineral fertilization; in the PIL zone can be caused by the stacking and maintenance of oil palm leaves. Thus, the maintenance of OM on the soil of the AFS, combined with the management of fertilization can contribute to raise soil fertility levels.

Keywords: Management zones. Management practices. Organic matter. Sustainable systems. Brazilian Amazon

3.1 Introdução

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) é uma oleaginosa de origem Africana, amplamente cultivada em regiões tropicais (KURNIA et al., 2016). É a oleaginosa de maior rendimento do mundo e é globalmente utilizada como fonte de óleo vegetal nas indústrias de alimentos, cosméticos e biocombustíveis (MIRANDE-NEY et al., 2019; VILLELA et al., 2014). Há uma demanda crescente por produtos derivados desta palmeira nos mercados nacional e internacional, resultando na necessidade de aumentar sua produção no mundo (KURNIA et al., 2016). O Brasil está entre os maiores produtores de óleo de palma no mundo (FAO, 2013) e entre os países com maior potencial de expansão de áreas agrícolas para essa cultura devido às condições favoráveis de clima e solo (RAMALHO FILHO et al., 2010). O estado do Pará, localizado na Amazônia brasileira, é responsável por aproximadamente 90% da produção nacional de óleo de palma (BRASIL, 2018).

Nos sistemas de cultivos de palma de óleo, o manejo realizado favorece a criação de zonas distintas dentro do sistema que causam variabilidade espacial de atributos químicos do solo (TAO et al., 2016). As zonas são determinadas por: (1) empilhamento das folhas podadas da palma de óleo entre as linhas duplas de palma de óleo, (2) adubação e controle de plantas espontâneas próximo ao estipe da planta (área de coroamento da palma de óleo) e (3) utilização de máquinas e implementos agrícolas nas entrelinhas da cultura para a colheita dos frutos e manejo do sistema (NELSON et al., 2015). Portanto, o manejo causa uma heterogeneidade espacial no acúmulo de resíduos orgânicos sobre o solo, com efeitos sobre sua fertilidade. (BEHERA et al., 2018).

Em geral, estudos reportam o impacto das práticas de manejo sobre a fertilidade do solo em cultivos de palma de óleo em diferentes regiões: Índia (MANORAMA et al., 2021), Colômbia (RÜEGG et al., 2019), Malásia (YUSUYIN; TAN; WONG, 2015), Tailândia (BOAFO et al., 2020) e Indonésia (CARRON et al., 2015; TAO et al., 2016; FORMAGLIO et al., 2021). Esses estudos reportaram o efeito positivo da aplicação de fontes orgânicas (de cachos de frutos vazios e empilhamentos das folhas de palma de óleo) na fertilidade do solo, como elevações nos teores de fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg) e cálcio (Ca), pH, saturação por bases (V%), capacidade de troca de cátions (CTC) e teor de matéria orgânica no solo (MO). Em geral, os efeitos positivos das fontes orgânicas aplicadas ao solo são decorrentes da decomposição dessas fontes, que é facilitada por microorganismos, contribuindo para a melhoria fertilidade do solo (TAO et al., 2016).

De maneira geral, a palma de óleo apresenta alta demanda por nutrientes (CORLEY; TINKER, 2016; VIÉGAS et al., 2022) e, por esse motivo, a otimização das práticas de manejo agrícola para melhorar a fertilidade do solo e manter o alto rendimento das culturas em geral é importante para o desenvolvimento sustentável da agricultura (GARNETT et al., 2013). O manejo sustentável de nutrientes do solo pode contribuir para aumentar a produtividade das culturas e evitar a degradação do solo (BEHERA et al., 2018). Em cultivos de palma de óleo, há grande potencial para a implementação de práticas de manejo sustentáveis de longo prazo, pois é uma cultura perene com uma vida comercial de aproximadamente 25 anos.

Sistemas biodiversos de cultivo, como os sistemas agroflorestais (SAFs), surgem como alternativa importante para o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável, principalmente para regiões tropicais (SUÁREZ et al., 2021). Os SAFs geralmente

apresentam altas taxas de aporte de matéria orgânica ao solo e propiciam condições mais favoráveis para a atividade microbiana, contribuindo assim, para melhorar a fertilidade do solo (ASIGBAASE et al., 2021; PEZARICO et al., 2013). Sistemas agroflorestais com palma de óleo têm sido estudados na Amazônia (CARVALHO et al., 2014; GOMES et al., 2021; MAIA et al., 2021; RAMOS et al., 2018; SANTIAGO et al., 2013); a maioria desses estudos focou em avaliações de carbono acima e abaixo do solo, micorriza e nitrogênio do solo, faltando, portanto, estudos sobre a variação espacial da fertilidade do solo em SAFs com palma de óleo. Desse modo, avaliar o comportamento da fertilidade do solo, por meio dos atributos químicos nos SAFs com palma de óleo, é uma estratégia imprescindível para analisar a sustentabilidade desses sistemas de produção.

Diferentes estudos foram realizados em SAFs com palma de óleo foram, porém estudos abordando a variabilidade espacial dos parâmetros da fertilidade do solo nesses sistemas ainda não foram relatados, inclusive na Amazônia. Os estudos sobre fertilidade do solo aconteceram principalmente em sistemas de monocultivos dessa cultura em regiões tropicais da Ásia (BEHERA et al., 2018; CARRON et al., 2016; FORMAGLIO et al., 2021; TAO et al., 2017b). Portanto, faltam estudos que avaliam os parâmetros de fertilidade nas zonas de manejo em SAFs com palma de óleo, na Amazônia Oriental.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar se os atributos químicos do solo variaram em função das zonas de manejo em sistemas agroflorestais com palma de óleo. Hipotetizamos que os atributos químicos variam entre as zonas devido ao manejo da adubação. Portanto, espera-se que os níveis de fertilidade do solo sejam mais altos no coroamento da palma de óleo e na faixa diversificada, pois recebem adubação mineral e orgânica; intermediário no empilhamento das folhas da palma de óleo, devido à deposição de material orgânico e; menor no carreador, pois não recebe adubação e possui menor aporte de matéria orgânica.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em sistemas agroflorestais com palma de óleo localizados no Sítio 1 (02°24'17"S, 48°14'37"W), Sítio 2 (02°20'54"S, 48°15'44"W) e Sítio 3 (02°40'42"S, 48°20'45"W) no município de Tomé-Açu, Amazônia Oriental

(Figura 1). O clima da região é tropical quente e úmido (Ami), segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), com temperatura média anual de 26 °C e precipitação média anual de 2400 mm. Os solos dos Sítios são caracterizados como Latossolo amarelo distrófico (EMBRAPA, 2018). A caracterização granulométrica dos solos dos SAFs estudados está descrita na Tabela 1.

No momento da implantação dos SAFs, as áreas apresentavam as seguintes coberturas:

pomar abandonado com aproximadamente 10 anos no Sítio 1; floresta sucessional com aproximadamente 11 anos no Sítio 2 e pastagem degradada ocupada por capim quicuío (*Urochloa humidicola*) de 25 anos no Sítio 3. O preparo de área dos Sítios 1 e 2 foi realizada pelo método de corte-e-trituração da vegetação, conforme descrito por CARVALHO et al. (2014); no Sítio 3 foi realizada gradagem porque não havia vegetação de porte arbóreo para o corte-e-trituração. Em 2008, a acidez do solo foi corrigida com 1,3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico. A necessidade de calcário (NC) aplicado nos sítios foi determinada pelo método do alumínio trocável com elevações de Ca e Mg (VELOSO et al. 2020). A fertilidade do solo antes da implantação dos SAFs com palma de óleo está apresentada na Tabela 2.

3.2.2 Caracterização dos sistemas de cultivo de palma de óleo

Em 2008, mudas de palma de óleo do híbrido intraespecífico Tenera com aproximadamente 15 meses e 2 m de altura foram plantados para formar dois arranjos de SAFs, cada um com 2 ha de área em cada Sítio. A palma de óleo foi combinada com diferentes tipos de espécies formando formando (1) o SAF-A: sistema agroflorestal menos biodiverso com espécies adubadeiras predominantes para contribuição na adubação verde, incluindo *Gliricidia sepium* e *Inga edulis* e (2) o SAF-B: sistema agroflorestal mais biodiverso que apresentava maior diversidade de espécies (arbóreas e arbustivas) para a produção de frutos, principalmente *Theobroma cacao*, produtos madeireiros e não-madeireiros, e adubação verde. Nos SAFs-A dos Sítios 1 e 3 os produtores introduziram outras espécies (frutíferas e madeireiras) aumentando a diversidade de espécies ao longo do tempo (BARROS et al. 2019). As espécies plantadas em cada SAF nos três Sítios estão descritas na Tabela 3.

Em todos os SAFs, mudas dos dendezeiros foram plantadas com espaçamento em triângulo equilátero (9,0 x 9,0 x 9,0 m) compondo filas duplas intercaladas por faixas diversificadas constituídas por espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas (Figura 2). As larguras das faixas diversificadas eram de 15 m, exceto no SAF-B do Sítio 1, onde a largura foi de 21 m. Na faixa diversificada, a distância entre plantas de cacau foi de 3,0 m; nas fileiras do cacau foram plantadas espécies lenhosas e frutíferas aproximadamente 5,0 m de distância.

3.2.3 Manejo dos sistemas

Na implantação dos sistemas, nas covas de plantio da palma de óleo, foi aplicada a combinação de 0,3 kg planta⁻¹ de fosfato reativo de rocha Arad (P₂O₅ total 33%, Ca 37%) kg de e carvão vegetal moído (P₂O₅ 3,36 %; N 0,51 %; K₂O 4.85 %, Mg 2,7 %) baseado na análise do solo e na recomendação de adubação da cultura para o estado do Pará (FRANZINI et al., 2020). As adubações de manutenção anual são descritas na Tabela 4. Os sistemas receberam adubos orgânicos e minerais permitidos na legislação brasileira sobre sistemas de produção com base orgânica (MAPA, 2008). Na palma de óleo, a adubação de manutenção foi realizada na área de coroamento (raio de 1,5 m a partir da base da planta). A adubação potássica anual foi dividida em duas aplicações (janeiro/fevereiro e maio/junho). Não houve adubação das espécies plantadas na faixa diversificada, exceto para *E. oleracea* e *T. cacao* ~~no sistema agroflorestal~~ (Tabela 4). Em dezembro de 2017, foi aplicado calcário dolomítico com implemento de distribuição de corretivos acoplado ao trator por toda a linha dupla de palma de óleo e manualmente a lanço na faixa diversificada em todos os SAFs.

Além das adubações de manutenção, também foram realizadas a remoção das plantas espontâneas ao redor da palma de óleo (coroamento, de 3 a 5 vezes por ano) e a poda periódica das folhas mais velhas (1-2 vezes por ano). As folhas podadas eram empilhadas entre as filas duplas de palma de óleo e as faixas diversificadas ou ao redor da área do coroamento nos SAFs do Sítio 3 (Figura 2), formando o que se denominou de empilhamento. Todo o material resultante das podas periódicas das espécies foi deixado sobre o solo da faixa diversificada. Além das podas, os resíduos das cascas dos frutos como o cacau dentro outros eram deixados no sistema. O trator que realizava a colheita e aplicava calcário trafegava entre as linhas de palma de óleo (carreador), onde o único manejo aplicado era a roçagem da vegetação espontânea. Todos os sistemas foram

manejados com práticas conservacionistas como o não-revolvimento e a manutenção da cobertura do solo, além da e adubação orgânica.

3.2.4 Amostragem do solo e processamento

Antes da coleta de solo, estabelecemos ao acaso quatro parcelas medindo 30 x 30 m (de modo a incluir duas faixas diversificadas e uma fila dupla de palma de óleo) em cada SAF. Em cada parcela, coletamos amostras de solo em locais específicos dos SAFs para avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo. As coletas foram realizadas em quatro locais (zonas de manejo): (1) coroamento da palma de óleo - zona em que as plantas indesejadas foram removidas e onde foi aplicada adubação, localizada a 60 cm da base do estipe do dendezeiro (ACP); (2) zona de tráfego de máquinas - carreador (CAR), (3) empilhamento de folhas - zona em que as folhas da palma de óleo eram depositadas (PIL); e (4) faixa diversificada (DIV) (Figura 2).

Em julho de 2018, em cada parcela coletamos com trado tipo caneco oito amostras simples para formação de uma amostra composta em todas as zonas de manejo nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm; nas camadas 30-50, 50-70 e 70-100 cm coletamos somente na área de coroamento e na faixa diversificada a fim de avaliar o comportamento dos atributos químicos do solo em camadas mais profundas em SAF com palma de óleo. As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas a 2 mm para a determinação dos atributos químicos do solo.

3.2.5 Análises químicas do solo

Todos os procedimentos das análises descritas a seguir são encontradas no manual de métodos de análise conforme TEIXEIRA (2017). O pH do solo foi determinado em água utilizando 10 g de solo na relação de solo e água (1:2,5); fósforo (P) disponível foi extraído pela solução de Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} e H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) em 10 g de solo e determinado por colorimetria em molibdato de amônio no espectrofotômetro (660 nm); cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} em 10 g de solo, sendo Ca^{2+} e Mg^{2+} determinados por espectrometria de absorção atômica e Al^{3+} determinado por titulação em solução de NaOH 0,1 mol L^{-1} ; o potássio (K) trocável foi extraído com solução Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} e H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) e determinado por fotometria de chama. A acidez potencial (H + Al) foi extraída por acetato de cálcio (0,5 mol L^{-1}) tamponado a pH 7 e

quantificada por titulação com solução padronizada de NaOH 0,025 mol L⁻¹. A matéria orgânica do solo (MO) foi quantificada via seca em mufla por incineração. Calculamos os seguintes parâmetros de fertilidade do solo: capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH7}), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%).

3.2.6 Análise estatística

Utilizamos a análise de componentes principais para avaliar os atributos químicos do solo em diferentes camadas do solo (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, 70-100). Para executar a PCA, padronizamos os atributos químicos do solo para que todos apresentassem média igual a 0 e desvio padrão igual a 1. Então, realizamos a PCA com o pacote `factoextra` no software R. Para avaliar os efeitos das zonas de manejo sobre os parâmetros de fertilidade do solo em cada camada, utilizamos modelos lineares de efeitos mistos (LMMs) (CRAWLEY, 2013; ZUUR et al., 2009). Os LMMs são mais apropriados e robustos para modelos aninhados como o nosso design amostral (SCHIELZETH e NAKAGAWA, 2013). Como efeitos fixos, as variáveis respostas foram: pH em água, Ca, Mg, P, K, Al, H+Al, CTC_e, CTC_{pH7}, m (%) e V (%) e as variáveis explicativas foram as zonas de manejo (CAR, ACP, PIL e DIV). Como efeitos aleatórios, utilizamos os Sítios (g1) e os SAFs dentro de cada Sítio (g2). Resultados significativos foram comparados usando análise de contraste agregando grupos e comparando a mudança de desvio (CRAWLEY, 2013). Quando o agrupamento não afetou significativamente o desvio, os grupos foram considerados iguais e, desse modo, simplificamos o modelo. Utilizamos a função `lmer` do pacote `lme4` para a criação do modelo linear misto (BATES et al., 2015) e a função `Anova` do pacote `car` para testar a significância por meio do teste Tipo II Wald Qui-quadrado. Utilizamos a função `cor` do pacote `ggcorrplot` para a correlação de Pearson para testar a correlação entre as variáveis.

3.3 Resultados

Os valores de p para o teste Qui-quadrado são apresentados na Tabela 5. O pH, Al e Mg não variaram entre zonas de manejo em nenhuma das camadas avaliadas (Figura 3A, B, F). Na camada 0-5 cm do solo, os atributos Ca, CTC_e, MO e V (%) apresentaram

o seguinte comportamento: $DIV=ACP=PIL>CAR$ e P e K apresentaram $DIV=ACP>PIL=CAR$ (Figura 3E, I, K, L). Na camada 5-10 cm do solo, o K seguiu o padrão $DIV=ACP=PIL>CAR$ enquanto o padrão para MO foi $ACP=PIL>DIV=CAR$ (Figura 3H, K). Na camada 10-20 cm do solo, houve variação entre as zonas de manejo para H+Al ($DIV=ACP=PIL>CAR$, Figura 3C), K ($DIV=ACP>PIL=CAR$, Figura 3H) e CTC_{pH7} ($DIV=ACP=CAR<PIL$, Figura 3J). Na camada 20-30 cm do solo, houve variação dos atributos em função das zonas de manejo: H+Al ($DIV=ACP=CAR<PIL$, Figura 3C), K ($DIV=ACP=PIL>CAR$, Figura 3H), CTC_{pH7} ($ACP=PIL>DIV=CAR$, Figura 3J) e MO ($ACP=PIL>DIV=CAR$, Figura 3L). Na camada 30-50 cm do solo, os atributos H+Al (Figura 3C), K, CTC_e e CTC_{pH7} apresentaram o mesmo comportamento em relação às zonas amostradas, ou seja, $ACP>DIV$ (Figura 3C, D, H, I, J). Na camada 50-70 cm do solo, a H+Al, m (%) (Figura 3D), K (Figura 3H), CTC_e (Figura 3I) e CTC_{pH7} (Figura 3J) resultaram em $ACP>DIV$, exceto para m (%) em que $DIV>ACP$ (Figura 3D). Na camada 70-100 cm do solo, K (Figura 3H) e MO (Figura 3K) apresentaram o seguinte comportamento: $ACP>DIV$.

A análise de componentes principais (PCA) mostrou que não há um padrão quanto à formação de grupos em relação às zonas de manejo avaliadas e aos atributos químicos nas camadas de solo. A PCA mostrou que os dois primeiros eixos explicaram 59,70%, 63,90%, 64,98%, 62,76%, 62,84%, 67,26% e 69,96 % da variação total nas camadas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-50 cm, 50-70 cm e 70-100 cm do solo, respectivamente (Figuras 4 A-D e 5E-G). De modo geral, a PC1 destacou-se por pH, Ca, Mg, Al, CTC_e , m (%) e V (%). O PC2 destacou-se por H+Al, CTC_{pH7} e MO. Os atributos P e K não apresentaram um padrão em relação aos dois componentes. Nas camadas 0-5 e 10-20 cm do solo, CAR apresentou menor nível de fertilidade do solo em relação às outras zonas de manejo (ACP, PIL e DIV). Na camada 20-30 cm do solo, no PC2, CAR e DIV apresentaram menor nível de fertilidade em relação às demais zonas de manejo. Nas camadas 30-50, 50-70 e 70-100 cm do solo, DIV apresentou menor nível de fertilidade em relação a ACP (Figura 5).

De 66 correlações, 40 foram consideradas fracas ($0,0 < r \leq 0,3$), 19 moderadas ($0,31 < r \leq 0,70$), 7 fortes ($0,71 < r \leq 1,0$). Dentre as correlações fortes, a correlação entre H+Al e V (%) foi a única negativa encontrada nesse estudo ($r = -0,74$), as demais foram positivas: Ca e CTC_{pH7} ($r = 0,86$); CTC_e e Ca ($r = 0,86$); CTC_{pH7} e CTC_e ($r = 0,87$); Al e MO ($r = 0,92$); pH e V (%) ($r = 0,82$) (Figura 6).

3.4 Discussão

Em geral, os parâmetros de fertilidade do solo foram influenciados pelas zonas de manejo nas diferentes camadas do solo, exceto pH, Al e Mg. A ausência de variabilidade espacial entre zonas de manejo para esses atributos pode estar relacionada à aplicação de calcário dolomítico que normalmente ocorre em área total e não se restringe a zonas específicas e visa a redução da acidez dos solos e adição de Mg.

Acreditamos que na zona de empilhamento das folhas o calcário pode não ter atingido o solo devido à camada espessa de folhas de palma de óleo que fica permanente sobre o solo (. Ainda assim, o pH dessa zona foi semelhante ao das demais zonas de manejo (ACP e DIV), por isso sugerimos que pH, Al e Mg podem ter sido promovidos pelo processo de decomposição do material vegetal depositados nesta zona (BUTTERLY; BALDOCK; TANG, 2013; MOKOLOBATE; HAYNES, 2002). No entanto, o nosso estudo não permite afirmar o efeito do empilhamento sobre esses atributos.

As zonas ACP, PIL e DIV, em geral, apresentaram maiores níveis de fertilidade do solo do que o CAR na camada 0 a 30 cm do solo (opção de texto: nos primeiros 30 cm do solo). O manejo de ACP, PIL E DIV inclui adubações externas (orgânicas e minerais), além do manejo pelo aporte de matéria orgânica no solo promovido tanto pelo *litterfall* quanto podas periódicas das espécies e cascas de frutos (principalmente do *T.cacao*). Apesar da semelhança na fertilidade do solo entre essas zonas de manejo (ACP, PIL e DIV), os fatores que influenciam são distintos.

Na ACP, são realizadas as adubações da palma de óleo, o que proporcionou maiores níveis de fertilidade do solo do que o CAR (RÜEGG et al., 2019). Foram aplicados adubos minerais por meio do fosfato natural de ARAD, polissulfato de potássio e sulfato de potássio. Além disso, foram aplicados torta de dendê e cacho de frutos vazios (adubos orgânicos) (Tabela 4), que possivelmente contribuíram para elevações nos níveis de fertilidade na ACP. Portanto, a aplicação de adubos minerais e a complementação com adubos orgânicos podem ter contribuído para elevar os teores de nutrientes (P, Ca e K), o teor de matéria orgânica, CTC_{pH7} e a saturação por bases (BOAFO et al., 2020; CARRON et al., 2015, 2016; TAO et al., 2017a).

Em geral, a palma de óleo demanda elevado fornecimento de nutrientes, principalmente K, que é o nutriente mais demandado na fase de produção de frutos

(CORLEY; TINKER, 2016; VIÉGAS et al., 2022). O K acumula-se em quantidades substanciais na biomassa da palma de óleo e é o mais abundante em cachos de frutos (MIRANDE-NEY et al., 2019, 2020). Logo, na ACP, além da adubação mineral, a complementação do nutriente com adubação orgânica muito provavelmente contribuíram para elevações nos teores de K no solo (MORADI et al., 2014; TAO et al., 2016). O manejo com resíduo orgânico (cacho de fruto vazio) favorece a atividade da fauna do solo e condições microclimáticas ideais (umidade e temperatura), contribuindo para a ciclagem de nutrientes e elevações nos níveis de fertilidade do solo (BOAFO et al., 2020; CARRON et al., 2016). Assim, a utilização de adubos orgânicos nos SAFs pode contribuir para a elevação nos níveis de fertilidade dos solos e potencializar a produção sustentável de palma de óleo.

Em geral, o K apresentou comportamento diferente dos demais nutrientes ao longo do perfil do solo, nas camadas subsuperficiais (30 a 100 cm). Os maiores teores de K nas camadas mais profundas na ACP do que no DIV pode ser reflexo da adubação (orgânica e mineral) e da translocação desse nutriente no perfil do solo. O K tem elevada mobilidade vertical ao longo do perfil do solo, o que é muito importante quando se há a aplicação do adubo potássico sobre a superfície (NOVAIS et al., 2007); logo, essa mobilidade pode garantir a absorção do nutriente pelas raízes em camadas mais profundas do solo. Nas camadas mais profundas pode ser encontrado as principais raízes responsáveis pela absorção de água e nutrientes, favorecendo, portanto, a absorção do potássio pela palma de óleo (CORLEY; TINKER, 2016; CRISTANCHO et al., 2011; RAMALHO FILHO et al., 2010).

O maior teor de MO, CTC_e e CTC_{pH 7} na zona ACP em relação a DIV verificado nas camadas subsuperficiais no solo dos SAFs pode estar relacionado ao sistema radicular da palma óleo. A palma de óleo apresenta sistema radicular fasciculado, profundo e abundante, sendo importante fonte de matéria orgânica para o solo (CORLEY; TINKER, 2016; JOURDAN; REY, 1997; RAMOS et al., 2018). A presença de raízes nas camadas mais profundas do solo pode ser uma fonte de matéria orgânica, que, ao se decompor, contribuirá para a formação de cargas negativas no solo, aumentando a CTC_{pH 7} (CARMO; LIMA; SILVA, 2016; GARCÍA-GÓMEZ; BERNAL; ROIG, 2005; XU et al., 2012). Estudos reportam que as raízes (tanto finas quanto grossas) da palma de óleo podem atingir profundidades acima de 1 m a depender da qualidade físico-química do

solo (GLORIA et al., 2021; NELSON et al., 2006). Assim, provavelmente as raízes subsuperficiais contribuíram para elevar a CTC do solo na zona ACP.

A zona DIV recebeu adubação mineral com fosfato natural de ARAD e polissulfato de potássio e adubação orgânica com torta de dendê nas espécies *T. cacao* e *E. oleracea*. Nessa zona, o *T. cacao* que ocorre em maior densidade, contribuindo para manutenção da MO. Além disso, o manejo da poda do cacauzeiro, a manutenção das cascas dos seus frutos (após a retirada das sementes) sobre o solo e a adubação orgânica (do cacauzeiro e do açazeiro) representam outras fontes de matéria orgânica que podem contribuir para elevar os níveis de fertilidade, por meio da deposição contínua desses materiais no solo. Efeitos positivos na fertilidade do solo tem sido reportados pela deposição de serrapilheira em SAFs com *T. cacao* na África (ASIGBAASE et al., 2021) e SAF multiestratificado na Mata Atlântica, Brasil (FROUFE et al., 2020). Logo, o aporte de serrapilheira, manejo da poda e adubação orgânica devem favorecer melhorias na fertilidade do solo nos SAFs.

Na zona PIL, onde são depositadas as folhas da palma de óleo, o solo apresentou níveis de fertilidade semelhantes a de ACP e DIV. Possivelmente, a deposição periódica das folhas podadas de palma de óleo deve favorecer a atividade dos microrganismos, que influenciarão positivamente na fertilidade do solo (RÜEGG et al., 2019; TAO et al., 2016). Os microrganismos do solo favorecem a ciclagem de nutrientes, além de serem importantes indicadores de qualidade do solo (FAGERIA; BALIGAR, 2008; FORMAGLIO et al., 2021). Estudos têm reportado aumentos nos teores de nutrientes (Ca, Mg e K) liberados na zona de pilha das folhas da palma de óleo via mineralização (AHOLOUKPÈ et al., 2016; YUSUYIN; TAN; WONG, 2015). Logo, a manutenção da zona de empilhamento em áreas de palma de óleo pode melhorar a fertilidade do solo.

No empilhamento, o teor de P foi menor do que nas zonas ACP e DIV. Isso pode ter ocorrido por três motivos: (1) a principal fonte fosfatada (fosfato natural de ARAD) é aplicada somente na ACP e na DIV (*T. cacao* e *Euterpe oleracea*); (2) as folhas da palma de óleo apresentam teores mais baixos de P em relação ao K, contribuindo menos para o processo de liberação desse elemento para o solo (FAIRHUST; HARDTER, 2012) e (3) o P na PIL pode estar incorporado à estrutura de compostos orgânicos, que resultam do processo de decomposição da matéria orgânica do solo, formando o P orgânico (P_o). O P pode ser encontrado de duas formas no solo: inorgânica (P_i) e orgânica (P_o) (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Com a adição de resíduos orgânicos no solo, o P da solução do solo

pode sofrer imobilização temporária devido a sua incorporação à biomassa microbiana, que é elevada pela fonte de carbono adicionada ao solo nessa zona (NOVAIS et al., 2007).

O resultado encontrado na zona CAR nesse estudo era esperado, ou seja, menores níveis de fertilidade entre as zonas de manejo, pois não recebe adubação, além de receber impactos diretos do maquinário da colheita dos frutos que afeta negativamente as propriedades físicas (SATO et al., 2017), inclusive a fertilidade do solo, como observado nesse estudo. Essa zona tende a apresentar menor teor de C orgânico (Gomes et al., 2021), além de menor qualidade física (Oliveira et al., 2022), impactando a fertilidade do solo. Logo, além da ausência de adubação nessa zona, outros fatores devem influenciar para o menor nível de fertilidade encontrado em relação às demais zonas de manejo (ACP, DIV e PIL).

Em geral, as zonas ACP, DIV e PIL apresentaram maior nível de fertilidade comparadas ao CAR e, conseqüentemente, maior disponibilidade de nutrientes, principalmente nas camadas superficiais. Os resultados mostram que as práticas de manejo realizadas nos SAFs, em geral, contribuem para manter a matéria orgânica do solo, o que favorece a retenção de nutrientes, principalmente nas zonas em que há adubação e em que a cobertura do solo é permanente. Em suma, essas práticas de manejo nessas zonas proporcionam benefícios na dinâmica da matéria orgânica e na ciclagem de nutrientes do solo (MANORAMA et al., 2021; RAHMAN et al., 2021).

3.5 Conclusões

Os atributos químicos do solo variam entre as zonas em função do manejo. As zonas que receberam adubação e aporte constante de resíduos vegetais apresentam melhor fertilidade do solo, principalmente nas camadas superficiais. Portanto, o cultivo da palma de óleo em sistemas agroflorestais, aliado a práticas de manejo que contribuem para manutenção da matéria orgânica no solo, pode contribuir na melhoria da fertilidade do solo e, conseqüentemente, garantir maior sustentabilidade dos sistemas de cultivos de palma de óleo na Amazônia.

REFERÊNCIAS

AHOLOUKPÈ, H. N. S. et al. Effet de la gestion des feuilles d'élagage du palmier à huile sur le stock de carbone et les propriétés physico-chimiques du sol dans les palmeraies villageoises du Bénin. **Biotechnology, Agronomy and Society and Environment**, v. 20,

n. 2, p. 171–182, 2016.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ASHTON-BUTT, A. et al. Understory Vegetation in Oil Palm Plantations Benefits Soil Biodiversity and Decomposition Rates. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 1, n. December, 2018.

ASIGBAASE, M. et al. Decomposition and nutrient mineralisation of leaf litter in smallholder cocoa agroforests: a comparison of organic and conventional farms in Ghana. **Journal of Soils and Sediments**, v. 21, n. 2, p. 1010–1023, 2021.

BATES, D. et al. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, p. 1–48, 2015.

BEHERA, S. K. et al. Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. **Catena**, v. 165, n. February, p. 251–259, 2018.

BOAFO, D. K. et al. Effect of organic soil amendments on soil quality in oil palm production. **Applied Soil Ecology**, v. 147, n. November 2019, 2020.

BRASIL. **Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo no Brasil**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília: Mapa/ACE, 2018. 57 p.

BUTTERLY, C. R.; BALDOCK, J. A.; TANG, C. The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. **Plant and Soil**, v. 366, n. 1–2, p. 185–198, 2013.

CARMO, D. L.; LIMA, L. B.; SILVA, C. A. Soil fertility and electrical conductivity affected by organic waste rates and nutrient inputs davi lopes. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, p. 1–17, 2016.

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.

CARRON, M. P. et al. Do the impact of organic residues on soil quality extend beyond the deposition area under oil palm? **European Journal of Soil Biology**, v. 75, p. 54–61, 2016.

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.

CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. Mineral Nutrition of Oil Palms. **The Oil Palm**, p. 329–398, 2016.

CRAWLEY, M. J. (2013). *The R book*. Oxford: Wiley.

CRISTANCHO, R. J. A. et al. Variations in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) progeny response to high aluminium concentrations in solution culture. **Plant Biology**, v. 13, n. 2, p. 333–342, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF, 2018. 356 p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Chapter 7 Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production. **Advances in Agronomy**, v. 99, n. 08, p. 345–399, 2008.

FAIRHURST, T. H; HARDTER, R. **Palma de aceite: Manejo para rendimientos altos y sostenibles**. International Plant Nutrition Institute (IPNI), y el International Potash Institute (IPI). 2012. 404 p.

FAO, 2013. FAOSTAT Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. www.faostat.fao.org.

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.

FRANZINI et al. Palma de óleo (Dendezeiro). *In* BRASIL, E. B.; CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M. **Recomendação de calagem e adubação para o estado do Pará**. Brasília, DF: Embrapa, 2020, 419 p.

FROUFE, L. C. M. et al. Nutrient cycling from leaf litter in multistrata successional agroforestry systems and natural regeneration at Brazilian Atlantic Rainforest Biome. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 1, p. 159–171, 2020.

GARCÍA-GÓMEZ, A.; BERNAL, M. P.; ROIG, A. Organic matter fractions involved in degradation and humification processes during composting. **Compost Science and Utilization**, v. 13, n. 2, p. 127–135, 2005.

GARNETT, T. et al. Sustainable intensification in agriculture: Premises and policies. **Science**, v. 341, n. 6141, p. 33–34, 2013.

GLORIA, G. C. P. et al. Root morphological traits of oil palm genotypes with differential resistance to fatal yellowing. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 6, p. 3073–3088, 2021.

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.

JOURDAN, C.; REY, H. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*elaeis guineensis jacq.*) root system: I. The model. **Plant and Soil**, v. 190, n. 2, p. 217–233, 1997.

KURNIA, J. C.; JANGAM, S. V.; AKHATAR, S.; SASMITO, A. P.; MUJUMDAR, A. S. Advances in biofuel production from oil palm and palm oil processing wastes: A review. **Biofuel Research Journal**, v.9, p.332-346, 2016.

MAIA, R. et al. Oil palm (*Elaeis guineensis*) shows higher mycorrhizal colonization when planted in agroforestry than in monoculture. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 4, 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 and Development**, v. 32, n. 13, p. 3785–3797, 2021.

MAPA (2008) Instrução Normativa n. 64 de 18 de dezembro de 2008. (in Portuguese)

MIRANDE-NEY, C. et al. Effects of Potassium Fertilization on Oil Palm Fruit

Metabolism and Mesocarp Lipid Accumulation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 67, n. 33, p. 9432–9440, 2019.

MIRANDE-NEY, C. et al. Metabolic leaf responses to potassium availability in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) trees grown in the field. **Environmental and Experimental Botany**, v. 175, n. January, p. 104062, 2020.

MOKOLOBATE, M. S.; HAYNES, R. J. Comparative liming effect of four organic residues applied to an acid soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 2, p. 79–85, 2002.

MORADI, A. et al. Decomposition and nutrient release temporal pattern of oil palm residues. **Annals of Applied Biology**, v. 164, n. 2, p. 208–219, 2014.

NELSON, P. N. et al. Using soil water depletion to measure spatial distribution of root activity in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations. **Plant and Soil**, v. 286, n. 1–2, p. 109–121, 2006.

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.

NOVAIS, R. F; ALVAREZ, V. H; BARROS, N. F; FONTES, R. L. F; CANTARUTTI, R. B; NEVES, J. C. Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. 1, 1017 p. 2007.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 911–920, 2008.

PEZARICO, C. R. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 1, p. 40–47, 2013.

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, 2010.

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 and Development**, v. 30, n. 16, p. 1904–1915, 2019.

SCHIELZETH, H.; NAKAGAWA, S. Nested by design: Model fitting and interpretation in a mixed model era. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 4, p. 14–24, (2013).

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.

SATO, M.K et al. Least limiting water range for oil palm production in Amazon region. **Brazil. Sci Agric**, v.74, p. 148-156 2017.

SPARLING, G. P. et al. Soil quality monitoring in New Zealand: Practical lessons from a 6-year trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 104(3), p 523–534, 2004.

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. March, 2021.

TAO, H. H. et al. Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm plantation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 218, p. 133–140, 2016.

TAO, H. H. et al. Long-term crop residue application maintains oil palm yield and temporal stability of production. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 37, n. 4, 2017a.

TAO, H. H. et al. Effects of best management practices on dry matter production and fruit production efficiency of oil palm. **European Journal of Agronomy**, v. 90, n. September, p. 209–215, 2017b.

TEIXEIRA, P. C. et al. 3. ed. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

VELOSO et al. Correção da acidez do solo. *In* Brasil, E. B.; CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de J. M. **Recomendação de calagem e adubação para o estado do Pará**. Brasília, DF: Embrapa, 2020, 419 p.

VIÉGAS, I. et al. Phosphate, potassium and magnesium fertilization on oil palm productivity: 12 years of monitoring in the Brazilian Amazon. **Journal of Plant Nutrition**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2022.

VILLELA, A. A. et al. Status and prospects of oil palm in the Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 67, p. 270–278, 2014.

XU, R. KOU et al. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. **Journal of Soils and Sediments**, v. 12, n. 4, p. 494–502, 2012.

YUSUYIN, Y.; TAN, N. P.; WONG, M. K. Nutrient status of frond heaps and the underlying soils at an 18-year-old oil palm field in Central Pahang, Malaysia. **Tropical Agriculture and Development**, v. 59, n. 4, p. 212–220, 2015.

ZUUR, A. F. et al. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. New York: Springer.

Tabela 1 - Caracterização granulométrica dos Sítios de sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Sítio	Areia	Silte	Argila
	g kg ⁻¹		
Camada 0-5 cm			
Sítio 1	699	112	190
Sítio 2	717	160	123
Sítio 3	740	151	140
Camada 5-10 cm			
Sítio 1	712	98	190
Sítio 2	688	133	180
Sítio 3	675	111	200
Camada 10-20 cm			
Sítio 1	623	133	245
Sítio 2	606	135	260
Sítio 3	578	162	220
Camada 20-30 cm			
Sítio 1	546	99	355
Sítio 2	480	144	377
Sítio 3	564	143	250
Camada 30-50 cm			
Sítio 1	433	132	435
Sítio 2	388	113	500
Sítio 3	555	132	250
Camada 50-70 cm			
Sítio 1	369	127	505
Sítio 2	331	100	570
Sítio 3	672	95	280
Camada 70-100 cm			
Sítio 1	361	79	560
Sítio 2	329	125	547
Sítio 3	635	106	290

Tabela 2 - Caracterização química do solo realizada no ano de 2008 na camada 0-20 cm do solo nos Sítios experimentais em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Sítio	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	MO	V
	H ₂ O	mg dm ⁻³							%	
Sítio 1	5,5	37,9	0,05	1,5	0,7	0,1	4,2	6,5	34,9	1,7
Sítio2	5,7	76,2	0,09	2	0,9	0,1	2,8	5,8	51,6	1,6
Sítio 3	5,7	76,2	0,09	2	0,9	0,1	2,8	5,8	51,6	1,6

Tabela 3 - Plantas consorciadas com palma de óleo em sistemas agroflorestais em três Sítios experimentais em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Espécies	Família	Sítio		
		Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3
<i>Acacia mangium</i> Willd.	Fabaceae		X	X
<i>Adenanthera pavonina</i> L.	Fabaceae	X	X	X
<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	Moraceae			X
<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	Meliaceae	X	X	X
<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Lecythidaceae	X		X
<i>Bixa orellana</i> L.	Bixaceae			X
<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	Callophyllaceae		X	
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Meliaceae	X	X	X
<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	Arecaceae	X	X	X
<i>Euterpe oleracea</i> Mart.	Arecaceae	X	X	
<i>Gliricidia sepium</i> Jacq.	Fabaceae	X	X	X
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Fabaceae	X		
<i>Inga edulis</i> Mart.	Fabaceae	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
Não identificada	Não identificada			X
<i>Oenocarpus mapora</i> H. Karsten	Arecaceae	X	X	
<i>Piper nigrum</i> L.	Piperaceae	X		X
<i>Platonia insignis</i> Mart.	Cluciaceae			X
<i>Sclerolobium paniculatum</i> Vogel	Fabaceae		X	
<i>Spondias lutea</i> L.	Anacardiaceae		X	X
<i>Swietenia macrophylla</i> King	Meliaceae			X
<i>Tabebuia</i> sp.	Bignoniaceae	X	X	
<i>Theobroma cacao</i> L.	Malvaceae	X	X	X
<i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Spreng)	Malvaceae		X	X
Vegetação espontânea	Não identificada		X	X
<i>Viola surinamensis</i> (Rol. ex Rottb.) Warb.	Myristicaceae	X		

Tabela 4 - Histórico de adubação e correção da acidez do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

Calcário / fertilizante	Unidade	Área de Coroament										Faixa diversificada				
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2008	2017	2018	
Calcário dolomítico ^d	kg ha ⁻¹	2200 ^v /1700 ^u /2700 ^x										1300 ^b				
Fosfato natural de ARAD ^e	kg planta ⁻¹	0,3		1	1,5							0,7	2,5	0,3 ^a	0,4 ^s /0,6 ^a /0,7 ^c	0,6 ^a /0,9 ^c
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 /2,5 ^c		
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							
Produbor 10 ^p	kg planta ⁻¹										0,1	0,15	0,1 ^c	0,10 ^a		
Polissulfato de potássio ^q	kg planta ⁻¹										2,6	4,50		0,175 ^a /0,70 ^c		
Sulfato de potássio ^r	kg planta ⁻¹	40					0,8	0,8	0,4	1,8			1,00		0,1 ^a /0,3 ^c	0,15 ^a /0,5 ^c

^a *Theobroma cacao* (Sítio 2 e 3)

^b Aplicado em toda a faixa diversificada

^c *Euterpe oleracea*

^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%

^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%

^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%

^s *Euterpe oleracea* (Sítio 1)

t Sítio 1

u Sítio 2

x Sítio 3

Fonte: Alessa Mendanha, modificada por Lucélia Costa

Tabela 5 - Análise da tabela de desvio do pH do solo, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio trocável (Al), acidez potencial (H + Al), saturação por alumínio (m%), capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH 7}), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V%) entre as zonas de manejo em sistemas agroflorestais com palma de óleo.

Resposta	Efeito fixo														Efeito aleatório	
	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm		20-30 cm		30-50 cm		50-70 cm		70-100 cm		g1	g2
	Quiq	Pr(>Quiq)	Quiq	Pr(>Quiq)	Quiq	Pr(>Quiq)	Quiq	Pr(>Quiq)	Quiq	Pr(>Quiq)	Quiq	Pr(>Quiq)	Quiq	Pr(>Quiq)		
pH	6,31	0,097	1,54	0,67	2,91	0,41	7,28	0,06	0,68	0,41	0,68	0,41	0,07	0,79	3	6
P	24,08	<0,001	6,96	0,07	6,91	0,07	4,09	0,25	0,09	0,76	0,19	0,66	0,05	0,83	3	6
K	27,81	<0,001	22,86	<0,001	52,86	<0,001	24,33	<0,001	7,12	0,08	2,67	0,10	2,53	0,11	3	6
Ca	21,76	<0,001	5,00	0,17	1,51	0,68	2,97	0,40	4,34	0,04	3,49	0,06	0,36	0,55	3	6
Mg	7,29	0,063	3,51	0,32	4,03	0,26	2,67	0,45	6,33	0,01	3,66	0,06	0,19	66,00	3	6
Al	1,06	0,7878	1,31	0,73	5,47	0,14	5,68	0,13	2,06	0,15	0,29	0,59	0,00	0,97	3	6
H+Al	7,49	0,0577	4,11	0,25	15,49	0,00	17,72	<0,001	3,86	0,05	6,71	0,01	1,31	0,25	3	6
CTC _{pH 7}	12,73	0,005	5,61	0,13	11,02	0,01	18,58	<0,001	12,64	<0,001	15,28	<0,001	3,02	0,08	3	6
CTC _e	21,85	<0,001	5,80	0,12	1,34	0,72	3,81	0,28	4,94	0,03	5,32	0,02	0,73	0,39	3	6
MO	38,43	<0,001	9,30	0,02	1,64	0,65	9,99	0,02	2,54	0,11	1,54	0,22	4,04	0,04	3	6
m (%)	3,61	0,3066	2,62	0,45	4,86	0,18	4,67	0,20	5,18	0,02	1,34	0,25	0,12	0,73	3	6
V (%)	18,17	<0,001	4,56	0,21	3,05	0,38	5,06	0,17	1,28	0,26	0,06	0,81	0,01	0,94	3	6

Nota: efeito aleatório: $\sim 1 \text{ g1/g2}$, onde a intercepto varia entre g1 e g2 dentro de g1. Dados relacionados com esta análise é apresentada na Figura 3. Quiq: refere-se ao teste Qui-quadrado.

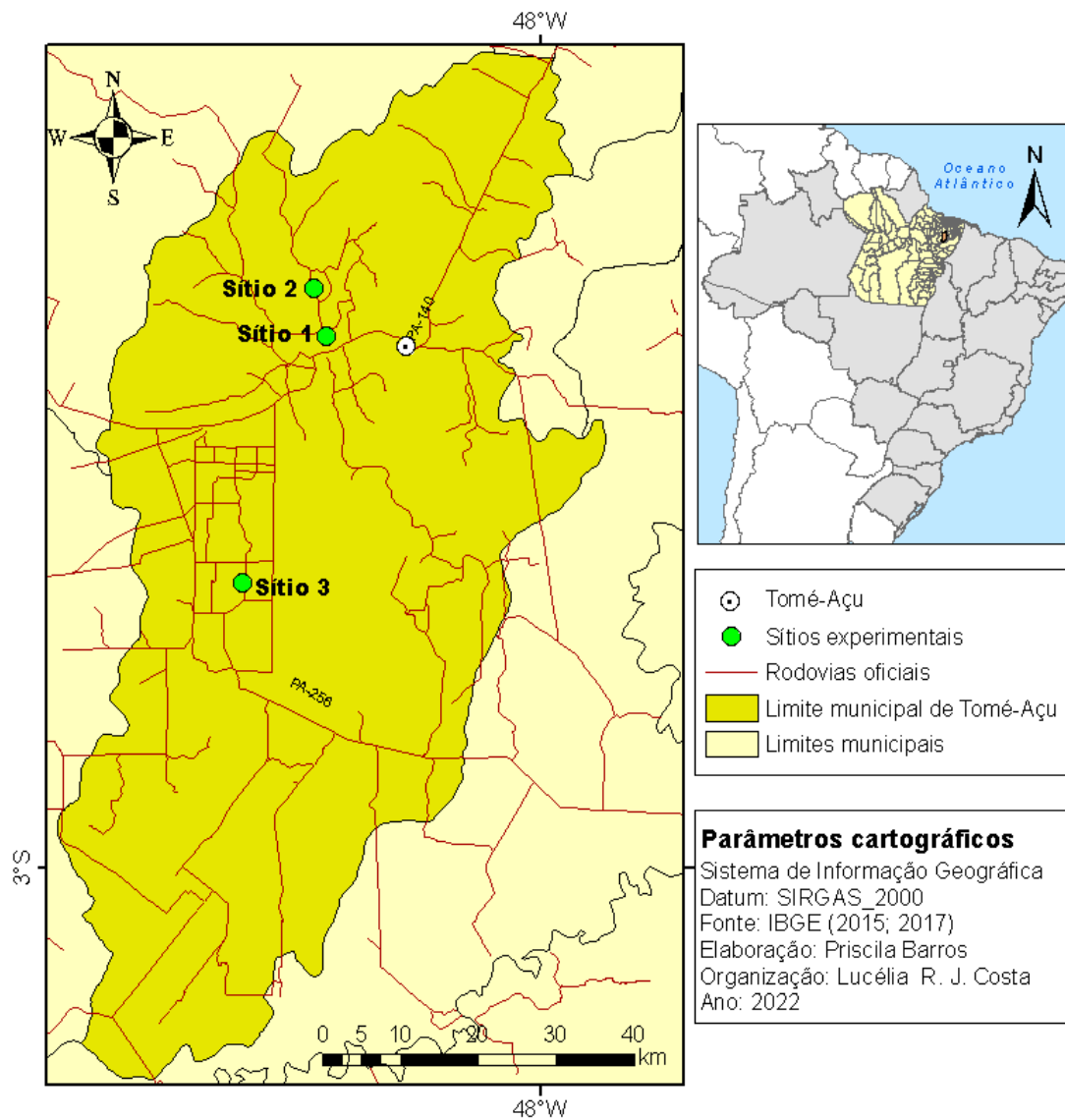


Figura 1 - Localização dos Sítios (Sítio 1, 2 e 3) com sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental.

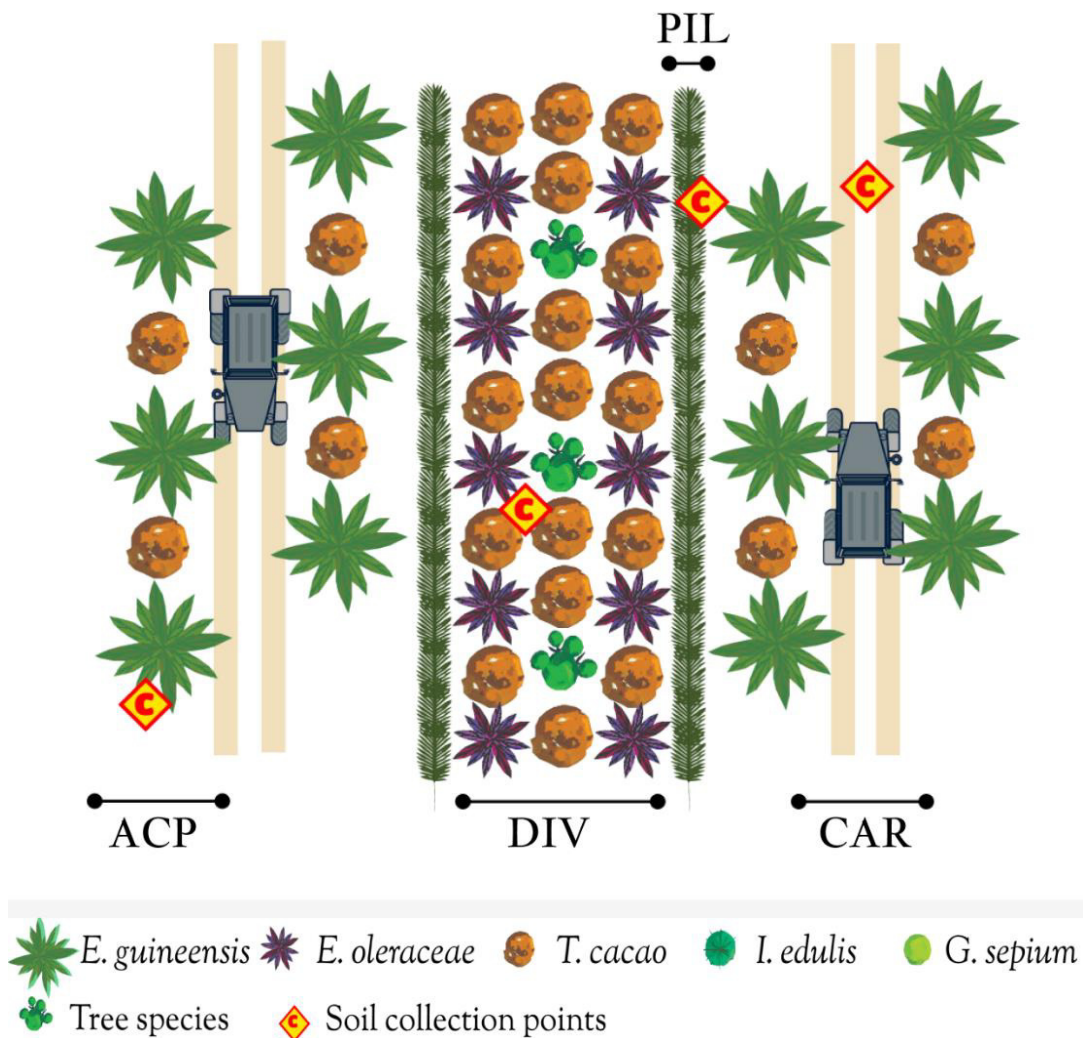


Figura 2 - Localização das zonas de manejo e pontos de amostragem de solos em sistemas agroflorestais de palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. ACP significa área de coroamento da palma de óleo; CAR, carreador; PIL, empilhamento de folhas de palma de óleo; DIV, faixa diversificada e; o losango representa os locais da amostragem de solos.

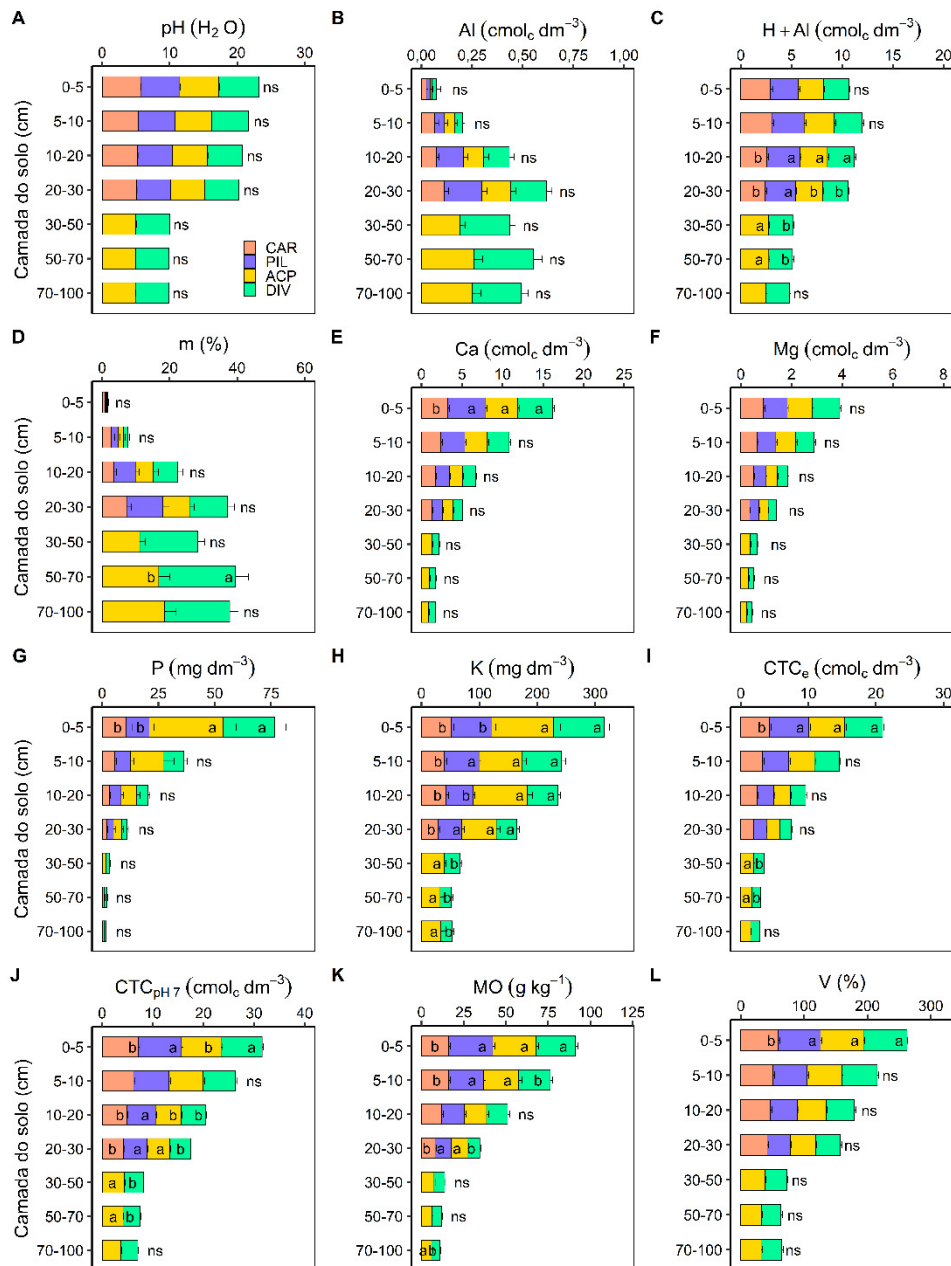


Figura 3 - Variação A) pH do solo, B) fósforo (P), C) potássio (K), D) cálcio (Ca), E) magnésio (Mg), F) alumínio trocável (Al), G) acidez potencial (H + Al), H) saturação por alumínio (m%), I) capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH 7}), J) capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e), K) matéria orgânica (MO) e L) saturação por bases (V%) entre zonas de manejo em diferentes camadas do solo em sistemas agroflorestais de palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental, Brasil. Letras diferentes indicam que as médias diferem entre si e ns que não houve diferença estatística entre as médias.

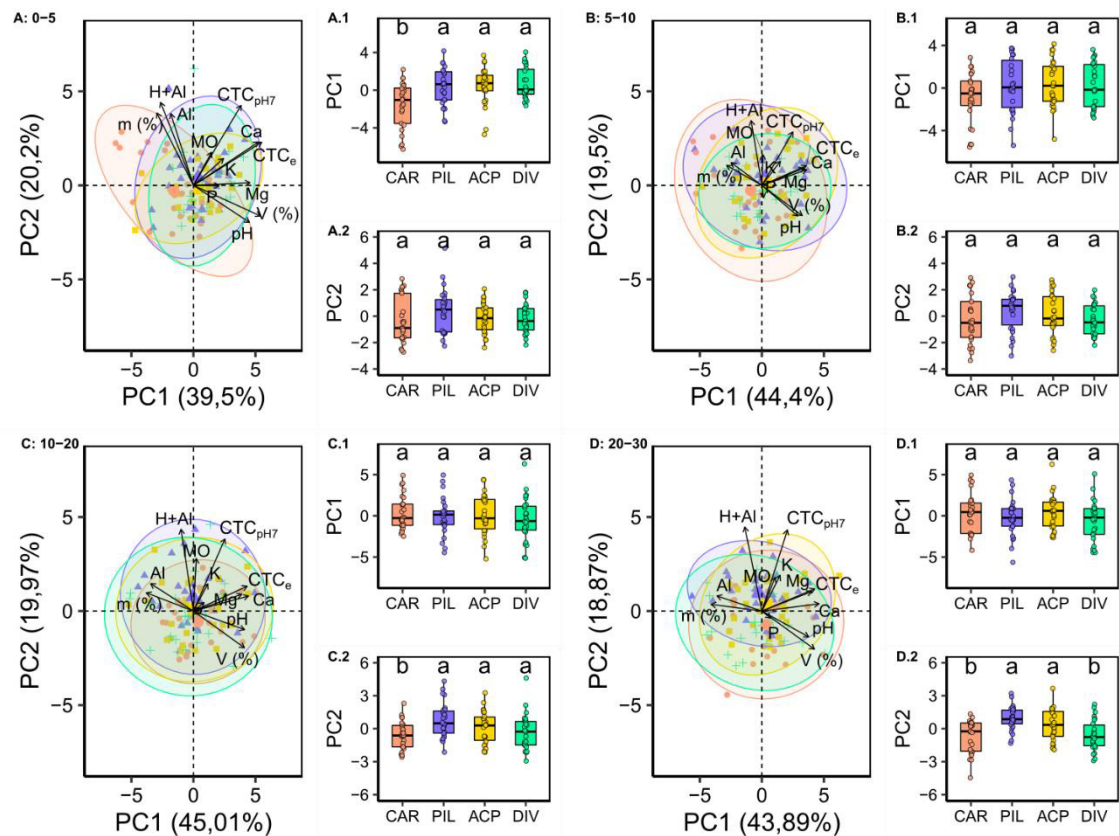


Figura 4 - Análise de componentes principais (PCA) dos atributos químicos de fertilidade do solo nas camadas: A) 0-5, B) 5-10, C) 10-20 e D) 20-30 cm do solo nos sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. O biplot ilustra as diferentes zonas de manejo do solo dos sistemas agroflorestais com palma de óleo: elipse amarela (ACP); elipse verde (CAR); elipse lilás (PIL) e elipse laranja (DIV). O boxplot mostra o comportamento das zonas de manejo (coroamento: (ACP), carreador: (CAR), empilhamento: (PIL) e faixa diversificada: (DIV)) em de cada um dos componentes principais.

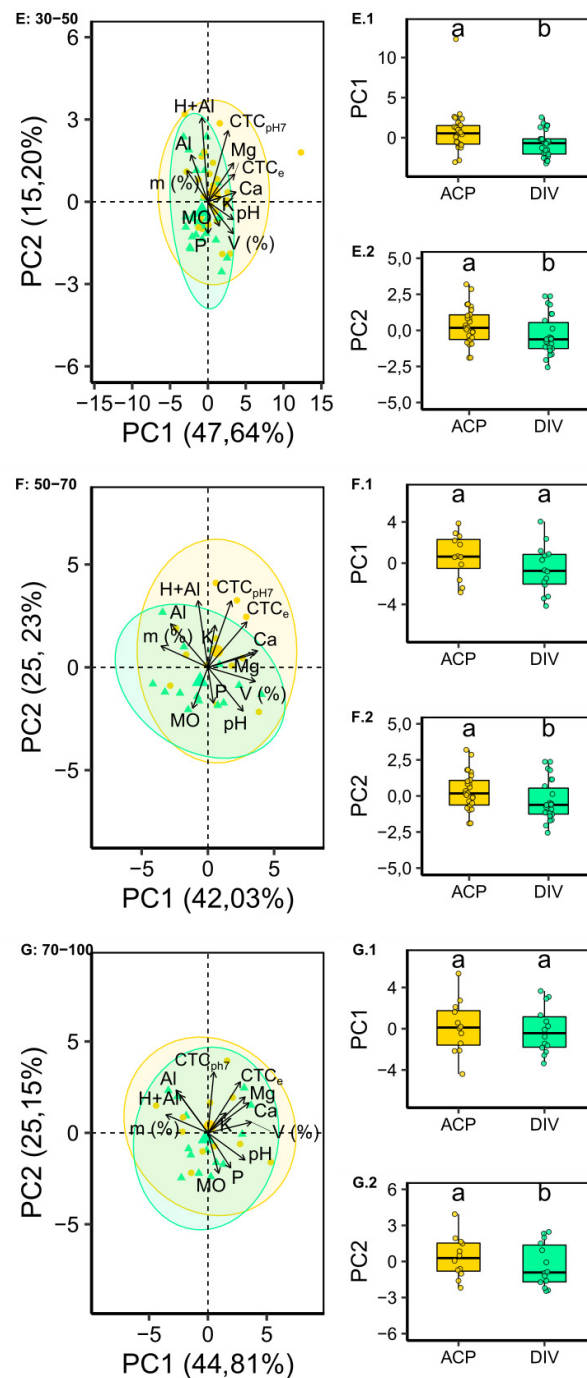


Figura 5 - Análise de componentes principais (PCA) dos atributos químicos de fertilidade do solo nas camadas de solo E) 30-50, F) 50-70 e G) 70-100 cm nos sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. O biplot ilustra as diferentes zonas de manejo do solo dos sistemas agroflorestais com palma de óleo: elipse amarela (ACP) e elipse verde (DIV). O boxplot mostra a diferença entre as zonas de manejo (coroamento: (ACP), e faixa diversificada: (DIV)) em cada um dos componentes principais.

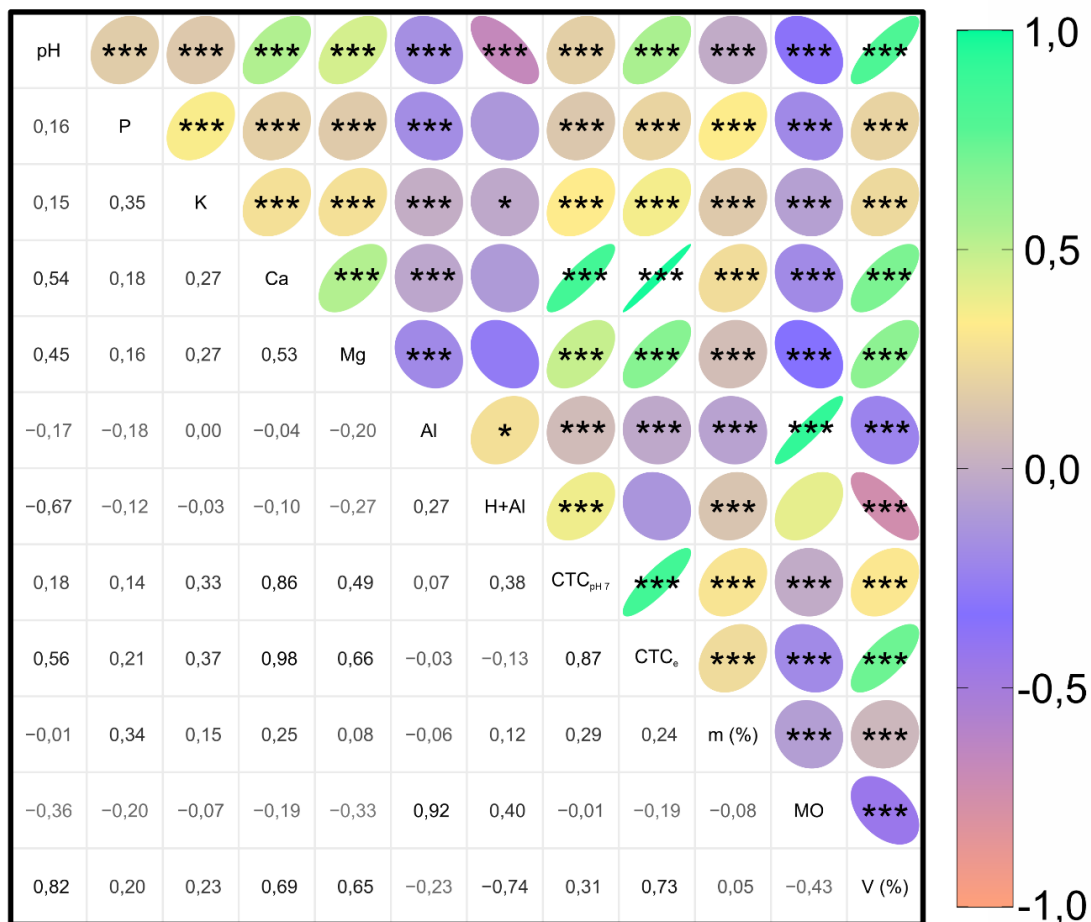


Figura 6 - Matriz de correlação dos resultados da análise de correlação pareados químicos do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. O tamanho e o grau de coloração de cada círculo são proporcionais à correlação de Pearson.

ANEXOS

ANEXO A: SISTEMA AGROFLORESTAL COM PALMA DE ÓLEO MENOS BIODIVERSO



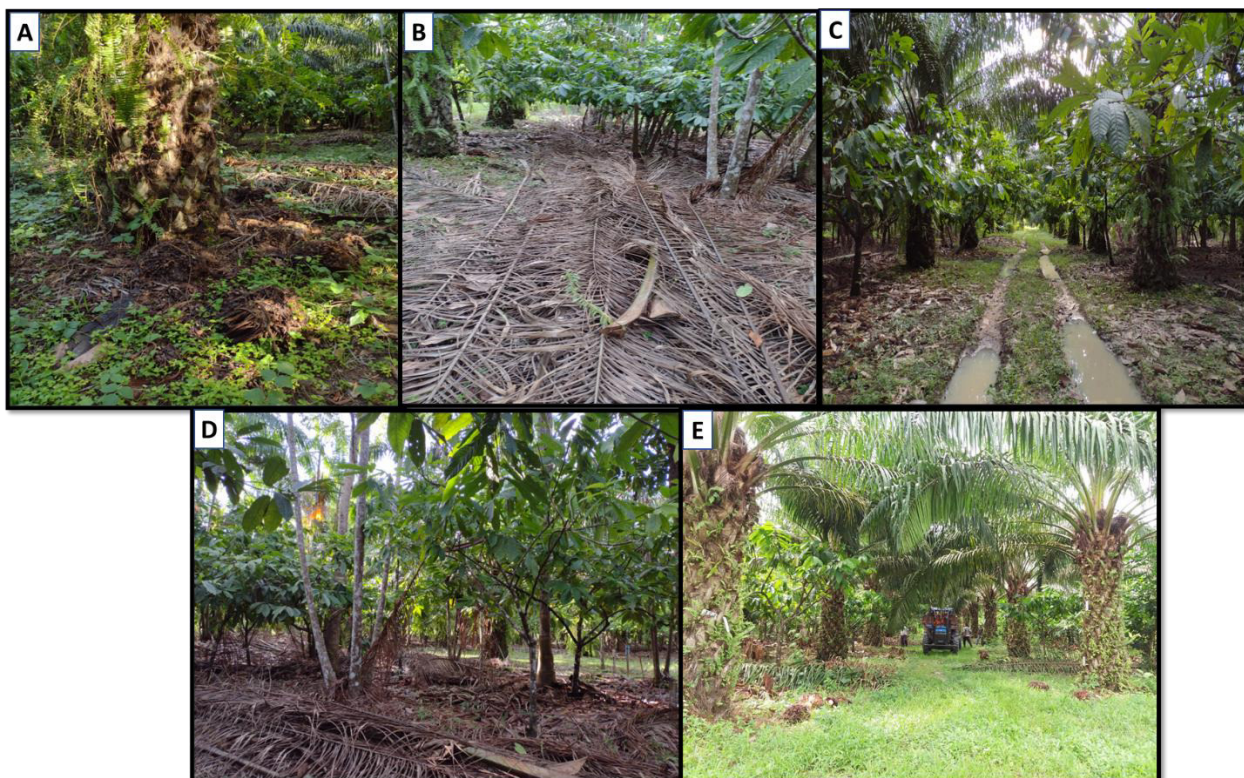
Fonte: Mila Façanha

**ANEXO B: SISTEMA AGROFLORESTAL COM PALMA DE ÓLEO MAIS
BIODIVERSO**



Fonte: Lucélia Costa

ANEXO C: DEPOSIÇÃO DE CACHOS DE FRUTOS VAZIOS NO COROAMENTO DA PALMA (A); EMPILHAMENTO DAS FOLHAS DA PALMA DE ÓLEO (B); TRÁFEGO DE MÁQUINAS (C; E); FAIXA DIVERSIFICADA (D).



Fonte: Lucélia Costa