



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - ICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS - PPGCF**

VICTOR HENRIQUE RODRIGUES DIAS

**QUALIDADE DE TECNOSOLO SOB DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE
ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO DE CAULIM NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

BELÉM-PA

2024

VICTOR HENRIQUE RODRIGUES DIAS

**QUALIDADE DE TECNOSOLO SOB DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE
ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO DE CAULIM NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), como requisito para obtenção do título de mestre em Ciência Florestais.

Orientador: Dr. Gustavo Schwartz

Coorientadora: Dra. Vânia Silva de Melo

BELÉM-PA

2024

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

D541q Dias, Victor

QUALIDADE DE TECNOSOLO SOB DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS
DEGRADADAS POR MINERAÇÃO DE CAULIM NA AMAZÔNIA ORIENTAL / Victor Dias. - 2024.
91 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Schwartz
Coorientador: Profa. Dra. Vânia.

1. Índice de qualidade do solo. 2. Estoque de carbono. 3. Indicadores microbiológicos. 4. Calagem. 5.
Método Miyawaki. I. Schwartz, Gustavo, *orient.* II. Título

CDD 631.4

VICTOR HENRIQUE RODRIGUES DIAS

QUALIDADE DE TECNOSOLO SOB DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO DE CAULIM NA AMAZÔNIA ORIENTAL.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), como requisito para obtenção do título de mestre em Ciência Florestais.

Data da Aprovação: 23/08/2024

Dr. Gustavo Schwartz (Orientador)

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Amazônia Oriental

Profa. Dra. Vânia Silva de Melo (Coorientadora)
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Prof. Dr. Possidônio Guimarães Rodrigues
Instituto Federal do Pará – IFPA

Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Prof. Dr. Walmer Bruno Rocha Martins
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus e à nossa senhora de Nazaré por todas as bênçãos em minha vida.

Aos meus pais, José Henrique Silva Dias e Raquel Maria Rodrigues Dias, por todo o apoio, incentivo, conselhos e por serem um exemplo para minha vida.

Ao meu orientador, Dr. Gustavo Schwartz, por todo o ensinamento, suporte, contribuições e confiança ao longo de todo processo de mestrado.

À minha coorientadora, Profa. Vânia Silva de Melo, por todos esses anos de conhecimento compartilhado, apoio, contribuições e incentivos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado.

À empresa Imerys SA pelo apoio financeiro e logístico durante a instalação do experimento e coleta de amostras.

Ao Prof. Mário Lopes da Silva Júnior por todos os ensinamentos, apoio e oportunidades que me proporcionou durante a graduação e o mestrado.

Ao Prof. Antônio Vinicius Correa Barbosa pela paciência e conhecimento compartilhado sobre análise de dados.

Ao Dr. Arystides Resende Silva pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Me. João Fernandes de Lima Neto, pelos conselhos e contribuições durante o desenvolvimento do trabalho.

À minha companheira, Paula Vanessa Corrêa Pinto, que me incentivou, apoiou e ajudou em diversos momentos.

Aos meus companheiros do GEQSAS, Emily Almeida, Gabriel Matos, Mayane Pantoja, Natália Rodrigues e Paulo Moy, por todo o suporte nas análises laboratoriais e pela amizade construída ao longo desses anos.

À Dra Mila Façanha Gomes por todas as contribuições com a escrita do trabalho.

A todos os meus colegas, amigos e a coordenação do programa de pós-graduação em ciências florestais que me ajudaram direta ou indiretamente, especialmente à Paula Lorena Pinheiro Lopes, Stefany Figueredo, Fiamma Nunes e ao Yan Nunes.

RESUMO

O Tecnossolo é uma alternativa para recuperação de áreas degradadas por mineração, pois a topografia do relevo é reconstruída com rejeitos oriundos da mineração e do beneficiamento, criando um ambiente para fauna e flora e destinando resíduos. Entretanto, para cumprir com os serviços ecossistêmicos de um solo natural, o Tecnossolo deve possuir uma boa qualidade. Com isso, o objetivo do estudo foi avaliar os indicadores químicos, físicos e microbiológicos de um Tecnossolo em diferentes métodos de recuperação de áreas degradadas por mineração de caulim após três anos em uma determinada condição de sítio. O experimento foi montado na mina IRCC em 2020 com os tratamentos: nucleação (NU), plantio adensado (PA), plantio florestal (PF), plantio florestal com calagem (PFC) e uma floresta nativa (FN) como ecossistema de referência. A coleta foi realizada em julho de 2023 nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm em quatro parcelas de 25x25 m de cada tratamento e em FN. No **primeiro capítulo**, foram avaliados os indicadores químicos: pH, matéria orgânica (MO), potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (AP), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), e os indicadores físicos: densidade do solo (DS), porosidade total (PT), resistência a penetração (RP), areia, silte e argila e o índice de qualidade do solo (IQS). Os indicadores físicos foram pouco alterados no Tecnossolo, com exceção de RP que foi positivamente afetado no PA, enquanto os químicos apresentaram maiores valores de pH, Ca, Mg, SB e V, e menores valores de Al e m no PFC. Maiores PT e menores DS e RP foram observados no FN. Além disso, o FN apresentou maiores valores de MO, AP, CTC, P, K, Al e m. O IQS no PFC foi maior no Tecnossolo e se igualou a FN na profundidade de 10-20 cm. Portanto, as características químicas foram alteradas positivamente com a calagem. Mas, as características estudadas ainda não se aproximam das do FN. No **segundo capítulo** foi abordado o carbono oxidável (CPOx), carbono orgânico (CO), carbono da Biomassa Microbiana (CBM), Respiração Basal (RBS), estoque de carbono orgânico (E-CO), quociente microbiano (qMIC) e o quociente metabólico (qCO₂). O CO não foi influenciado pelos tratamentos, enquanto o E-CO e CPOx foram alterados pelo NU e PA, contendo os maiores valores. Para CBM e RBS, os maiores valores foram na profundidade de 10-20 cm, foi em NU e 10-20 cm em PA em CBM e PA=NU em RBS. Para qMIC, em 0-10 cm foi maior em NU e PFC e 10-20 cm em PA. qCO₂ foi maior em PF na profundidade de 10-20 cm. Com isso, para os indicadores estudados, o Tecnossolo difere da floresta nativa. Entretanto, a nucleação se destaca aos demais tratamentos.

Palavras-chaves: índice de qualidade do solo, estoque de carbono, indicadores microbiológicos, calagem, nucleação, método Miyawaki.

ABSTRACT

Technosol is an alternative for recovering areas degraded by mining, as the topography of the land is reconstructed with tailings from mining and processing, creating an environment for fauna and flora and disposing of waste. However, in order to fulfill the ecosystem services of a natural soil, the Technosol must be of good quality. With this in mind, the aim of the study was to evaluate the chemical, physical and microbiological indicators of a Technosol in different methods of recovering areas degraded by kaolin mining after three years in a given site condition. The experiment was set up at the IRCC mine in 2020 with the following treatments: nucleation (NU), dense planting (PA), forest planting (PF), forest planting with liming (PFC) and a native forest (FN) as a reference ecosystem. The soil was collected in July 2023 at depths of 0-10 cm and 10-20 cm in four 25x25 m plots in each treatment and in the FN. In the **first chapter**, the chemical indicators were assessed: pH, organic matter (OM), potassium (K), phosphorus (P), calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al), potential acidity (PA), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), base saturation (V), aluminum saturation (m), and the physical indicators: soil density (DS), total porosity (PT), penetration resistance (RP), sand, silt and clay, and the soil quality index (IQS). The physical indicators were little altered in the Technosol, with the exception of PR which was positively affected in the PA, while the chemical indicators showed higher pH, Ca, Mg, SB and V values, and lower Al and m values in the PFC. Higher PT and lower DS and RP were observed in the FN. In addition, the FN had higher MO, AP, CTC, P, K, Al and m values. The IQS in the PFC was higher in the Technosol and was equal to the FN at a depth of 10-20 cm. Therefore, the chemical characteristics were positively altered by liming. However, the characteristics studied are still not close to those of the FN. The **second chapter** looked at oxidizable carbon (CPO_x), organic carbon (CO), microbial biomass carbon (CBM), basal respiration (RBS), organic carbon stock (E-CO), microbial quotient (qMIC) and metabolic quotient (qCO₂). CO was not influenced by the treatments, while E-CO and CPO_x were altered by NU and PA, with the highest values. For CBM and RBS, the highest values were at a depth of 10-20 cm, in NU and 10-20 cm in PA in CBM and PA=NU in RBS. For qMIC, at 0-10 cm it was highest in NU and PFC and at 10-20 cm in PA. qCO₂ was highest in PF at a depth of 10-20 cm. Thus, for the indicators studied, the Technosol differs from the native forest. However, nucleation stands out from the other treatments.

Keywords: soil quality index, carbon stock, microbiological indicators, liming, nucleation, Miyawaki method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produção de caulim no Brasil e produção de substâncias minerais no estado do Pará, Brasil..... 13

PRIMEIRO CAPÍTULO.....

Figura 2 - Mapa de localização da mina IRCC (A) e precipitação pluviométrica (B), Ipixuna do Pará, PA, Brasil..... 33

Figura 3 - Diagrama com as variáveis e suas cargas retidas nas componentes principais..... 38

Figura 4 - Comparação dos indicadores de qualidade físico entre os tratamentos no Tecnosolo... 39

Figura 5 - Comparação dos indicadores de qualidade químicos entre os tratamentos no Tecnosolo 40

Figura 6 - Comparação dos indicadores de qualidade físico entre os tratamentos no Tecnosolo com a floresta nativa..... 41

Figura 7 - Comparação dos indicadores de qualidade químicos entre os tratamentos no Tecnosolo com a floresta nativa..... 43

Figura 8 – Correlação de Spearman dos indicadores de qualidade do solo na profundidade de 0-10 cm (A) e na de 10-20 cm (B)..... 44

Figura 9 – Análise de componentes principais dos indicadores de qualidade do solo na profundidade de 0-10 cm (A) e na de 10-20 cm (B)..... 45

Figura 10 – Comparação entre tratamentos (A) e cada tratamento com a floresta nativa para profundidade de 0-10 cm (B) e 10- 20 cm (C) para o índice de qualidade do solo..... 46

SEGUNDO CAPÍTULO.....

Figura 11 - Comparação dos indicadores: carbono orgânico, estoque de carbono e carbono oxidável, entre os tratamentos no Tecnosolo..... 70

Figura 12 - Comparação dos indicadores microbiológicos entre os tratamentos no Tecnosolo..... 71

Figura 13 - Comparação dos indicadores: carbono orgânico, estoque de carbono e carbono oxidável, entre os tratamentos no Tecnosolo com a área de referência..... 72

Figura 14- Comparação dos indicadores microbiológicos entre os tratamentos no Tecnosolo com a área de referência..... 73

Figura 15 - Correlação de Spearman dos indicadores avaliados..... 74

Figura 16 – Biplot da análise de componentes principais das variáveis estudadas com os tratamentos e a floresta nativa.....75

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRO CAPÍTULO.....	
Tabela 1 - Áreas avaliadas na mina IRCC, Ipixuna do Pará, PA, Brasil.....	34
Tabela 2 - Lista de espécies plantadas nos tratamentos no Tecnossolo na mina IRCC, Ipixuna do Pará, PA, Brasil.....	34
Tabela 3 - Resultado da análise de componentes principais.....	37
Tabela 4 - Comparação da textura de um Latossolo Amarelo (FN) e um Tecnossolo sob diferentes métodos de recuperação.....	41
SEGUNDO CAPÍTULO.....	
Tabela 5 - Caracterização química e física do experimento na mina IRCC, Ipixuna do Pará, PA, Brasil.....	65

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

Al	Alumínio trocável
AP	Acidez potencial
Ca	Cálcio
CBM	Carbono da biomassa microbiana
CO	Carbono orgânico do solo
CO ₂	Dióxido de carbono
CPOx	Carbono oxidável do solo
CTC	Capacidade de troca catiônica
DS	Densidade do solo
E-CO	Estoque de carbono
FN	Floresta nativa
IQS	Índice de qualidade do solo
K	Potássio
m	Saturação por alumínio
Mg	Magnésio
MO	Matéria orgânica
NU	Nucleação
P	Fósforo
PA	Plantio adensado
CP	Componente principal
PF	Plantio florestal
PFC	Plantio florestal com calagem
pH	Potencial hidrogeniônico
PT	Porosidade total
qCO ₂	Quociente metabólico
qMIC	Quociente microbiano
RBS	Respiração basal do solo
RP	Resistência a penetração
SB	Soma de bases
V	Saturação por bases

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
1.1 Importância e características do caulim.....	13
1.2 Recuperação florestal de ecossistemas pós-mineração.....	14
1.2.1 Recuperação do solo pós-mineração.....	17
1.3 Qualidade do solo e seus indicadores de sustentabilidade.....	18
2 PERGUNTAS CIENTÍFICAS.....	20
2.1 Primeiro capítulo.....	20
2.2 Segundo capítulo.....	21
3 HIPÓTESES.....	21
3.1 Primeiro Capítulo.....	21
3.2 Segundo Capítulo.....	21
4 OBJETIVOS.....	21
4.1 Objetivo geral.....	21
4.2 Objetivos específicos.....	21
REFERÊNCIAS.....	22
5 PRIMEIRO CAPÍTULO.....	29
QUALIDADE QUÍMICA E FÍSICA DE UM TECNOSSOLO PÓS-MINERAÇÃO DE CAULIM SOB DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	29
5 FIRST CHAPTER.....	30
CHEMICAL AND PHYSICAL QUALITY OF A POST-KAOLIN MINING TECHNOSOL UNDER DIFFERENT RECOVERY METHODS IN THE EASTERN AMAZON.....	30
5.1 Introdução.....	31
5.2 Material e Métodos.....	32
5.2.1 Área de Estudo.....	32
5.2.2 Delineamento Experimental.....	33
5.2.3 Coleta de solo.....	35
5.2.4 Análises de solo.....	35
5.2.5 Índice de Qualidade do Solo.....	37
5.2.6 Análise de dados.....	38
5.3 Resultados.....	39
5.3.1 Tratamentos no Tecnosolo.....	39

5.3.2	Tratamentos no Tecnosolo x floresta nativa.....	41
5.3.2	Correlação entre as variáveis.....	43
5.3.3	Análise de componentes principais (ACP).....	44
5.3.4	Índice de qualidade do solo.....	46
5.4	Discussão.....	47
5.4.1	Qualidade Física do Tecnosolo sob diferentes técnicas de recuperação de área degradada.....	47
5.4.2	Qualidade química do Tecnosolo sob diferentes técnicas de recuperação de área degradada.....	48
5.4.3	Análise multivariada da qualidade química e física de um Tecnosolo sob diferentes técnicas de recuperação de área degradada.....	51
5.5	Conclusão.....	52
	REFERÊNCIAS.....	52
6	SEGUNDO CAPÍTULO.....	60
	CARBONO E INDICADORES MICROBIOLÓGICOS EM TECNOSSOLO PÓS-MINERAÇÃO DE CAULIM SOB DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS NA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	60
6	SECOND CHAPTER.....	61
	CARBON AND MICROBIOLOGICAL INDICATORS IN A TECHNOSOL AFTER KAOLIN MINING UNDER DIFFERENT METHODS OF RECLAMATION OF DEGRADED AREAS IN EASTERN AMAZON.....	61
6.1	Introdução.....	62
6.2	Material e Métodos.....	63
6.2.1	Área de estudo.....	63
6.2.2	Delineamento experimental.....	64
6.2.3	Amostragem.....	66
6.2.4	Análises de laboratório.....	66
6.3.4	Análise de dados.....	69
6.3	Resultados.....	69
6.3.1	Comparação entre as técnicas de recuperação de área degradadas em Tecnosolo.....	69
6.3.2	Técnicas de recuperação do Tecnosolo x ecossistema de referência.....	71
6.3.3	Análise multivariada de diferentes indicadores de carbono.....	74
6.4	Discussão.....	75
6.5	Conclusão.....	78
	REFERÊNCIAS.....	78

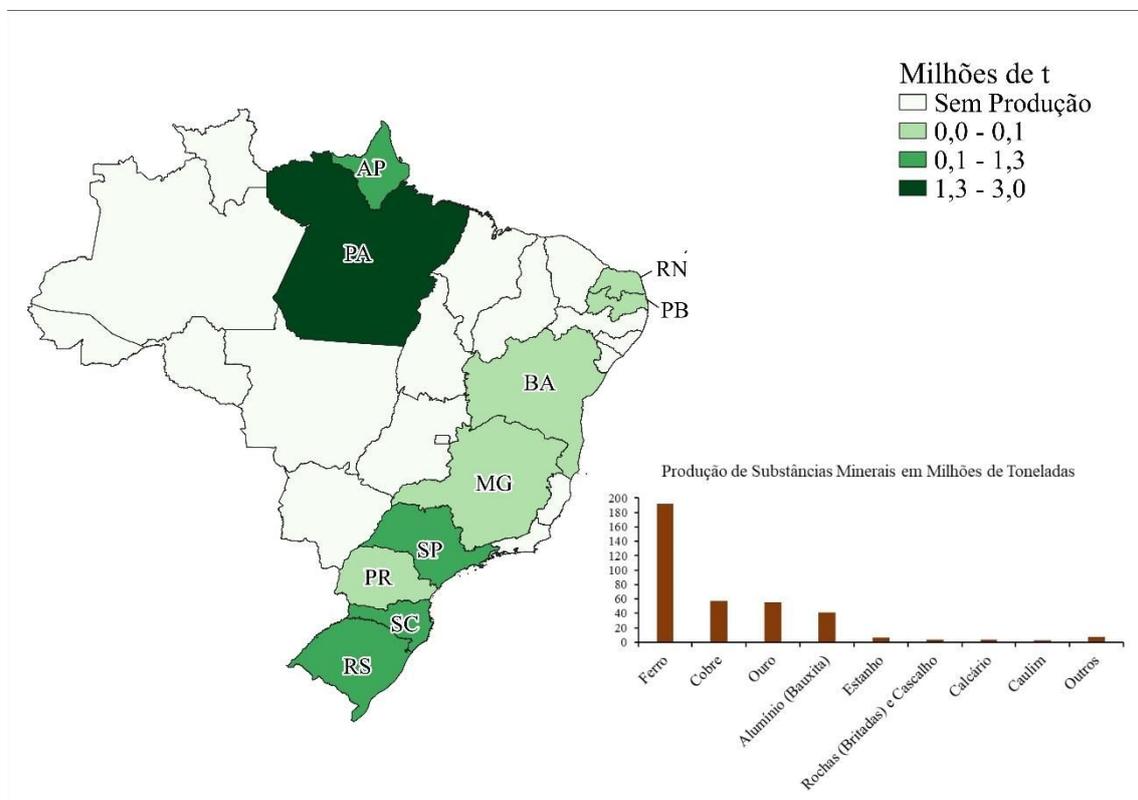
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
	APÊNDICE A - p-valor dos contrastes avaliados pelo teste Dunnett para as propriedades físicas do solo. DS – densidade do solo; PT – porosidade total; RP – resistência a penetração.....	86
	APÊNDICE B - p-valor dos contrastes avaliados pelo teste Dunnett para as propriedades químicas do solo. MO – matéria orgânica; P – fósforo; K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al – alumínio; AP – acidez potencial; SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca catiônica; V – saturação por bases; m – saturação por alumínio.....	87
	APÊNDICE C – p-valor dos contrastes avaliados pelo teste Dunnett para as variáveis: CO – carbono orgânico; CPOx – carbono oxidável; E-CO – estoque de carbono; CBM – carbono da biomassa microbiana; RBS – respiração basal do solo; qMIC – quociente microbiano; qCO ₂ – quociente metabólico.....	88

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1 Importância e características do caulim

A mineração é uma atividade importante para economia brasileira. No país, em 2021, foram extraídos 1,7 bilhões de toneladas de minérios metálicos e não metálicos (ANM, 2022), dos quais 372,5 milhões de toneladas foram destinadas para exportação, rendendo 57,8 bilhões de dólares (IBRAM, 2022). Um importante minério para o Brasil é o caulim, devido ao fato que uma das maiores reservas do minério no mundo se encontra no país. Segundo dados da Agência Nacional de Mineração (2022), foram extraídas aproximadamente quatro milhões de toneladas de caulim bruto em 2021 no país, onde o estado do Pará foi responsável por uma produção de 2,6 milhões de toneladas, sendo a 8º minério mais extraído do estado (Figura 1). O minério é importante para as exportações brasileiras, rendendo 122,2 e 156 milhões de dólares nos anos de 2021 e 2022, respectivamente (IBRAM, 2023). Portanto, a mineração do caulim é fundamental para diversos setores da economia. Em contrapartida, sua extração causa danos ambientais significativos desafiadores, mas que devem ser contornados (Lima *et al.*, 2016).

Figura 1 - Produção de caulim no Brasil e produção de substâncias minerais no estado do Pará, Brasil.



Fonte: Autor com dados da ANM, 2022

No estado Pará, a mineradora Imerys possui duas minas de caulim, sendo a Rio Capim Caulim (IRCC), maior em operação de extração do mundo, e a Pará Pigmentos S.A (PPSA), que hoje encontra-se desativada, localizadas no município de Ipixuna do Pará, onde o minério é transportado por meio de minerodutos para o porto da empresa em Barcarena-PA e em seguida é exportado (IMERYS, 2023). As minas ficam próximas ao rio capim que ocorrem na formação de Ipixuna do período Cretáceo Superior-Terciário Inferior de origem *in situ* (Sousa *et al.* 2007), sendo classificado em macio (soft), com alto grau de intemperismo e processo de caulinização, e o duro (flint), fase anterior do intemperismo (Santos; Rossetti, 2008).

O caulim ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) é uma rocha composta principalmente pelos minerais silicatados hidratados de alumínio, caulinita e haloisita, além de ocorrer outros minerais, como: dickita e nacrita (Oyebanjo *et al.*, 2020). Na rocha há o predomínio dos óxidos SiO_2 e Al_2O_3 , mas também ocorre os de Fe_2O_3 e TiO_3 , que diminuem a qualidade e alteram sua coloração branca, mas que podem ser removidos pelo processo de beneficiamento, aumentando a qualidade do caulim (Nyakairu; Koeberl; Kurzweil, 2001). A caulinita é o principal mineral que compõe o caulim, sendo um silicato do tipo 1:1 com folha tetraédrica de sílica (SiO_2) unida por oxigênio e folha de octaédrica de alumínio (Al_2O_3). O mineral possui alta estabilidade química e baixa troca catiônica e expansão (Mustapha *et al.*, 2019). Para Buyondo *et al.* (2022), as rochas mais puras contêm o teor mínimo de 90% de caulinita. As características do caulim lhe conferem grande importância industrial, pois é um material quimicamente inerte em ampla faixa de pH, macio e pouco abrasivo, não tóxico e facilmente dispensável em água (Brito *et al.* 2019).

O caulim extraído da IRCC atende a indústria de papel, seguido pela produção de cerâmica, tintas e cosméticos, além da produção de cimento, que utiliza o caulim duro (Oyebanjo; Ekosse; Odiyo, 2020). As rochas com altos teores de caulinita também podem ser utilizadas na indústria farmacêutica (Awad *et al.*, 2020). O caulim também pode ser utilizado como defensivo em cultivo de algodoeiro de artrópodes-pragas (Da Silva, 2020).

1.2 Recuperação florestal de ecossistemas pós-mineração

A mineração de substâncias metálicas como ferro, alumínio, cobre, ouro, prata, e o caulim, ocorrem predominantemente em regiões com alta biodiversidade (Murguía; Bringezu; Schaldach, 2016). O fato de os recursos minerários e energéticos encontrarem-se principalmente nessas regiões, torna esses ecossistemas mais susceptíveis a constantes e graves perturbações (Macdonald *et al.*,

2015a). Nesse sentido, vem ganhando notoriedade na agenda ambiental internacional a necessidade de restaurar ambientes degradados, de modo a mitigar os impactos causados pela degradação dos ecossistemas (Adams *et al.*, 2021). Para a mineração, é inevitável que a vegetação original seja destruída e o solo perdido, degradando o ambiente e alterando a paisagem, que já não conseguirá fornecer seus serviços ecossistêmicos (Bradshaw, 1997). Além disso, a atividade, principalmente a realizada a céu aberto, poderá degradar o lençol freático em áreas próximas ao ponto de mineração (Frouz, 2022). Com isso, se faz necessário restaurar ou recuperar a paisagem afetada. Entretanto, a restauração do ecossistema posterior a atividade minerária apresenta desafios substanciais como a reconformação topográfica do relevo e a recomposição das funções do ecossistema (Macdonald *et al.*, 2015b). Nesse contexto, o Tecnossolo¹ é fundamental por recriar a topografia e destinar resíduos da mineração, criando um ambiente para o desenvolvimento de plantas e retorno da fauna (Macdonald *et al.*, 2015b; Rees *et al.*, 2019; Ruiz *et al.*, 2020).

A Sociedade Internacional para a Restauração Ecológica (SER, 2004) define a restauração ecológica como uma atividade que inicia ou acelera a recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado, transformado ou totalmente destruído devido à ação humana direta ou indiretamente, visando sua saúde, integridade e sustentabilidade. Na legislação brasileira, o termo restauração é definido como a restituição do ecossistema que outrora foi degradado a uma condição próxima da original, enquanto o de recuperação, refere-se a um ambiente em condição sustentável diferente da original (ICMBIO, 2014). A restauração de áreas degradadas pode ser ativa ou passiva, dependendo do grau de interferência humana no processo. As técnicas ativas necessitam de interferência humana, enquanto nas passivas, a recuperação se baseia na resiliência da área degradada (Meli *et al.*, 2017).

As intervenções em áreas degradadas visam a revegetação com a reintrodução de espécies-chave conforme conhecimento dos grupos ecológicos (Oliveira, 2021). Com isso, é importante salientar que as espécies florestais são comumente classificadas quanto à necessidade de luminosidade. A exemplo disso, Swaine e Whitmore (1988) as classifica em climáticas e

¹“Também Urban e Mine soils. São solos cujas propriedades e pedogênese são dominadas pela sua origem técnica. Contêm uma quantidade significativa de artefatos (substância reconhecidamente feito ou fortemente alterado pelo homem, ou extraído de grandes profundidades) ou são selados por material duro técnico (material duro criado por humanos, com propriedades diferentes das rochas naturais) ou contêm uma geomembrana. Incluem os solos provenientes de resíduos (aterros, lamas, cinzas, resíduos de minas e cinzas), pavimentos com os seus materiais não consolidados subjacentes, solos com geomembranas e solos construídos. Outras classificações: Russian soil classification system = formação superficial Tecnogênica; Australian soil classification = Antropossolos” (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015).

secundárias e, subdivide em pioneiras, secundárias iniciais e secundárias tardias. Já Whitmore (1989), classificou as espécies em pioneiras e não pioneiras. Vale ressaltar, que a restauração em florestas tropicais é especialmente desafiadora e demorada, pois são biodiversas e complexas, além de que a sua fisionomia deve ser de espécies arbóreas de ciclo de vida longo (Brancalion; Gandolfi; Rodrigues, 2015).

O processo de restauração deve considerar a sucessão natural, já que cada estágio da sucessão favorece o próximo, de modo que espécies iniciais alteram o ambiente de forma que facilitam o estabelecimento de outras espécies (Peroni; Henández, 2011). Logo, a sucessão refere-se ao estudo de como as comunidades biológicas se alteram após distúrbios naturais ou antrópicos (Chang; Turner, 2019). A sucessão pode ser classificada em primária, quando a vegetação inicia em área sem nenhum solo, e secundária, quando a sucessão se inicia em local que a vegetação preexistente foi destruída, porém, o solo se manteve (Brancalion; Gandolfi; Rodrigues, 2015). Na sucessão primária, o material recém-exposto é colonizado por líquens, gramíneas, arbustos e árvores, enquanto a comunidade biológica do solo é restabelecida com o aumento de matéria orgânica no sistema. Já na sucessão secundária, dependendo da perturbação, uma sequência semelhante, porém mais rápida ocorre, retornando o sistema a um estado anterior à perturbação (Mosier; Córdova; Robertson, 2021). É importante destacar que o conhecimento referente à dinâmica de sucessão da floresta é fundamental para escolha adequada do método de restauração (Oliveira, 2021).

Nos últimos anos vem aumentando a pressão da sociedade para a restauração de áreas florestais degradadas, para isso é fundamental que se tenha leis e políticas públicas que visam a proteção dos recursos ambientais. No Brasil, a Lei 97.632 de abril de 1989 foi criada para regulamentar o artigo 2º da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981), obrigando que empreendimentos que exploram recursos minerários apresentem o Plano de Recuperação de Área Degradadas (PRAD) no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e no Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) (Brasil, 1989). Entretanto, somente com a Lei 9.605 de fevereiro de 1998, denominada como lei de crimes ambientais, foi disposto sanções penais e administrativas para condutas danosas ao meio ambiente (Brasil, 1998). Já a instrução normativa n.º 11 de dezembro de 2014 afirma que o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) deve conter medidas que visam a recuperação ou restauração da área perturbada, ou degradada fundamentado

nas características bióticas, abióticas, causador do impacto, resiliência da vegetação e a sucessão vegetal (ICMBIO, 2014).

1.2.1 Recuperação do solo pós-mineração

Os solos são recursos não renováveis fundamentais para sustentar a vida nos ecossistemas (Araújo; Monteiro, 2007; Ruiz; Cherubin; Ferreira, 2020; Silva *et al.*, 2021) e, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), são definidos como uma coleção de corpos naturais, composto por parte sólida, líquida e gasosa, tridimensional, dinâmica, formado por material orgânico e mineral, com matéria viva (Santos, 2018). Estes, por sua vez, possuem propriedades químicas, físicas e biológicas que são interconectadas e oferecem variados e numerosos serviços ecossistêmicos. Staub *et al.* (2011), por exemplo, em um estudo de caso na Suíça, listou 23 serviços ecossistêmicos que são diretamente usados, consumidos e experimentados pelos humanos. Dominati, Patterson Mackay (2010) classificaram como os principais serviços do solo: o habitat, produção, sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes, regulação das emissões de gases do efeito estufa, entre outros que estão ligados diretamente à saúde dos ecossistemas terrestres. O solo é um dos mais importantes reservatórios de carbono da terra, o sequestro de carbono orgânico vem sendo considerado uma possível solução para mitigar as mudanças climáticas, visto que este possui a capacidade de armazenar duas a três vezes mais o carbono do que a atmosfera (Minasny *et al.*, 2017). Sendo assim, a recuperação de solos degradados é importante para a manutenção do capital natural (Dominati; Patterson; Mackay, 2010).

Os Tecnosolos são solos desenvolvidos a partir de materiais feitos, modificados ou expostos por atividade humana que de outra forma não ocorreria na superfície da terra (Ruiz *et al.*, 2020). A sua construção vem sendo utilizada como estratégia para o manejo de rejeitos oriundos de mineração, que outrora seriam armazenados em barragens de rejeitos e pilhas de material estéril. Os “solos” oriundos da mineração são geralmente compostos por material fragmentado misturado e despejado, que frequentemente sofre forte intemperismo, não apresentam horizontes definidos e são pouco estruturados (Frouz, 2022). Para a recuperação adequada do solo, as camadas dos solos devem ser separadas no momento da mineração, para que na construção dos Tecnosolo seja possível depositar o solo estéril separado do *topsoil* (Martins *et al.*, 2021), proporcionando o restabelecimento da ciclagem de nutrientes por fornecer matéria orgânica, microrganismos e propágulos de plantas (Macdonald *et al.*, 2015a). Entretanto, o armazenamento do material prejudica a sua qualidade (Gupta; Kirby; Pinno, 2019), logo, o armazenamento e o tempo de

estocagem devem ser adequados para conservar as suas características químicas e microbiológicas (Macdonald *et al.*, 2015b).

Os solos construídos após atividade minerária normalmente apresentam condições que limitam o desenvolvimento de plantas. Nos Tecnossolos podem ser encontrados pH extremos (alcalinos ou ácidos), textura do solo variada, baixa disponibilidade de nutrientes (Frouz, 2022), alta densidade do solo, resistência à penetração, entre outros. Por isso, a utilização de técnicas para melhorar a qualidade do Tecnossolo é fundamental para o sucesso da restauração. A utilização de subsolagem, para descompactar o solo, e a calagem, para corrigir a acidez do solo, são técnicas recomendadas para acelerar o processo de restauração após extração de bauxita (Martins *et al.*, 2021). Também é comum a aplicação de técnicas que contribuem para restauração por meio da aplicação de matéria orgânica ao solo, tais como: a aplicação de serapilheira, transposição de solo arável, visto que, a adição do material orgânico ativa o processo de restauração ambiental em áreas degradadas por mineração (Onésimo *et al.*, 2021; Rocha *et al.*, 2021). Nesse sentido, a melhora nas condições ambientais do Tecnossolo é fundamental, pois sua qualidade determina a natureza do ecossistema e a sua capacidade de sustentar a vida (Brady; Weil, 2013). Diante disso, a qualidade dos solos construídos deve ser considerada para o sucesso do plano de recuperação de área degradada em área de mineração.

1.3 Qualidade do solo e seus indicadores de sustentabilidade

A qualidade do solo, segundo o conceito de Karlen *et al.* (1997), pode ser definida de duas maneiras distintas; como uma característica inerente de um solo e como a condição ou "saúde" do solo, ou seja, seria a “capacidade de um tipo específico de solo funcionar como ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade animal e vegetal, manter a qualidade da água e do ar e suportar o crescimento humano”. Outra classificação é a de Johnson *et al.* (1997), que conceituou a qualidade do solo como sendo a “condição do solo relativa aos requerimentos de uma ou mais espécies biológicas e/ou de algum propósito humano”. Dessa forma, a qualidade do solo perpassa por sua capacidade de sustentar a produtividade e a saúde vegetal e ambiental, logo, um solo equilibrado é essencial para o desenvolvimento vegetal (Araújo; Monteiro, 2007).

A qualidade do solo é mensurada de maneira indireta pelos indicadores que, por sua vez, são propriedades ou funções sensíveis que refletem o estado ambiental ou a condição de

sustentabilidade do ecossistema e estão relacionados às propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Araújo; Monteiro, 2007; Araújo *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2021). Existe uma grande quantidade de indicadores para avaliar a qualidade do solo, eles podem ser classificados em dois grupos em relação ao seu foco principal: 1º - indicadores que descrevem o estado atual do sistema do solo; 2º - indicadores que se concentram na mudança da qualidade do solo e no manejo aplicado do solo (Drobnik *et al.*, 2018). Sendo a primeira, referente às funções e propriedades fundamentais para um solo de alta qualidade, assim como quais são ameaças a esse solo. Enquanto a segunda, aos diferentes sistemas de manejo e como alteram a produtividade do solo.

Os indicadores de qualidade podem ser químicos, por exemplo, os macronutrientes são fundamentais para o desenvolvimento de plantas e para vida no solo, participando de moléculas, proteínas, enzimas e coenzimas importantes para atividade microbiana, metabolismo e desenvolvimento de plantas e decomposição da matéria orgânica (Alves Pradela *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2020; Maurya *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2019). A matéria orgânica é um componente fundamental do solo, apesar de seu percentual ser pequeno, ela confere diversas propriedades benéficas ao solo, plantas e microrganismos, aumentando a retenção de cátions e água, fornecendo nutrientes para plantas e microrganismos, além de contribuir para agregação do solo (Brady; Weil, 2013). Outro indicador é a presença de elementos tóxicos no ecossistema, como o alumínio, o qual é associado à redução da taxa de crescimento radicular de plantas (Ferreira; Moreira; Rassini, 2006). Este pode ser um problema recorrente em solos construídos a partir de rejeito de caulim, devido à composição da rocha, logo, é um bom indicador de qualidade. Vale ressaltar, que os rejeitos de mineração de caulim geralmente possuem baixa fertilidade e são compostos principalmente por areia.

Os indicadores físicos de qualidade estão principalmente relacionados ao crescimento radicular, trocas gasosas, atividade biológica e retenção de água (Arshad; Martin, 2002). Entre os indicadores físicos mais utilizados, a resistência a penetração vem sendo usada para avaliar o grau de compactação (Araújo *et al.*, 2012), pois a maior compactação gera uma maior resistência e, conseqüentemente, uma maior dificuldade no enraizamento de plantas (Shah *et al.*, 2017). Outro indicador de qualidade física é a densidade do solo, a qual é a massa de sólidos que ocupa um determinado volume do solo, estando relacionado a compactação e a porosidade. Os solos bem estruturados apresentam o aumento de macroagregados e da porosidade, diminuindo a densidade, enquanto solos compactados aumentam a densidade, visto que as forças comprimem o solo e diminuem os espaços porosos (Shah *et al.*, 2017). A densidade está relacionada com a porosidade

total, os quais são frequentemente utilizados como indicadores por serem dinâmicos e suscetíveis a alterações no solo (Araújo *et al.*, 2012).

Os microrganismos participam de diversos processos no solo, como: gênese, ciclagem de nutrientes e decomposição da matéria orgânica (Bünemann *et al.*, 2018; Mendes; Sousa; Reis Junior, 2015). Este fato lhes confere alta sensibilidade às alterações na qualidade do solo (Araújo; Monteiro, 2007; Araújo *et al.*, 2012; Gonçalves *et al.*, 2019) provocadas por mudanças em fatores abióticos, como temperatura e umidade, e bióticos, como a mudança na cobertura do solo. A biomassa microbiana compreende a fração viva do solo, exceto a macrofauna e as raízes, sendo um excelente indicador para medir a regeneração do solo após a perda da camada superficial (Frighetto, 2000), pois reflete o desenvolvimento do solo e as mudanças ocorridas na matéria orgânica (Silva *et al.*, 2021). O carbono imobilizado, também denominado carbono da biomassa microbiana, é geralmente utilizado para determinar o tamanho da comunidade de microrganismos. Também é comum o uso da respiração basal do solo como indicador, a qual expressa a oxidação biológica da matéria orgânica por meio da liberação do CO₂ pelos microrganismos (Araújo; Monteiro, 2007; Silva *et al.*, 2021), indicando a atividade metabólica da biomassa (Da Silva *et al.*, 2010) e a velocidade da decomposição da matéria orgânica (Novak *et al.*, 2018). Ademais, podem ser estimados os valores dos coeficientes metabólico e microbiano, onde o primeiro reflete a quantidade de CO₂ liberado por unidade de carbono da biomassa ao longo do tempo (Araújo; Monteiro, 2007; Ramos *et al.*, 2020), indicando a eficiência dos microrganismos em incorporar carbono (Silva *et al.*, 2016), enquanto o segundo se refere ao teor de carbono imobilizado pelos microrganismos (Da Silva *et al.*, 2010). Com isso, o uso desses indicadores fornece informações acerca da recuperação da qualidade do Tecnosolo.

2 PERGUNTAS CIENTÍFICAS

2.1 Primeiro capítulo

- 1) Entre os métodos de recuperação de áreas degradadas (plantio adensado, nucleação, plantio sem calagem e plantio com calagem), qual torna as propriedades químicas e físicas do solo mais próximas do ecossistema de referência após mineração de caulim?

2.2 Segundo capítulo

- 1) Entre os métodos de recuperação de áreas degradadas (plantio adensado, nucleação, plantio sem calagem e plantio com calagem), qual é mais eficiente para aumentar o teor de carbono e melhorar a qualidade microbiológica no Tecnosolo?

3 HIPÓTESES

3.1 Primeiro Capítulo

- 1) O uso de diferentes métodos de recuperação em área degradada pela mineração de caulim, iram promover melhora na qualidade química e física do Tecnosolo, possibilitando a restauração ecológica.

3.2 Segundo Capítulo

- 1) O uso de diferentes métodos de recuperação em área degradada pela mineração de caulim vai aumentar o conteúdo de carbono no Tecnosolo e, conseqüentemente, melhorar a sua qualidade microbiológica.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Avaliar os indicadores químicos, físicos e microbiológicos de um Tecnosolo em diferentes métodos de recuperação de áreas degradadas por mineração de caulim após três anos em uma determinada condição de sítio.

4.2 Objetivos específicos

- 1) Comparar a qualidade química e física de um Tecnosolo sob diferentes métodos de recuperação de área degradada;
- 2) Comparar o carbono em Tecnosolo sob diferentes métodos de recuperação de área degradada;
- 3) Comparar a qualidade microbiológica de um Tecnosolo sob diferentes métodos de recuperação de área degradada.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, C. *et al.* Governança da Restauração Florestal da Paisagem no Brasil: desafios e oportunidades. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 58, p. 450–473, 2021.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES PRADELA, V. *et al.* Influência do Volume de Substrato com NPK na Célula da Bandeja no Desenvolvimento Inicial de Mudas de Abóbora. **Alomorfia**, v. 6, n. 4, p. 580–597, 2022.
- ANM. **Anuário Mineral Brasileiro (ANB)**. 2022. Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/anuario-mineral-brasileiro-amb> Acesso em: 05 março 2023
- ARAÚJO, A. S. F. DE; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores Biológicos de Qualidade do Solo Biological. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, p. 66–75, 2007.
- ARAÚJO, E. A. DE *et al.* Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 187–206, 2012.
- ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 153–160, 2002.
- AWAD, M. E. *et al.* Flow and tableting behaviors of some egyptian kaolin powders as potential pharmaceutical excipients. **Minerals**, v. 10, n. 1, p. 1-23, 2020.
- BRADSHAW, A. Restoration of mined lands-using natural processes. **Ecological Engineering**. v.8, p. 255-269, 1997.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ªed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.
- BRANCALION P. H. S.; GABDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração Florestal**. 1º ed. São Paulo: Oficina de Texto. 2015.
- BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 13 fev. 1998 e retificado 17 fevereiro 1998.

BRASIL. Lei nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 12 abril 1989.

BRITO, C., D., L. T., MOUTINHO-PEREIRA, J., CORREIA, C. Kaolin, an emerging tool to alleviate the effects of abiotic stresses on crop performance. *Scientia Horticulturae*, v. 250, p. 310-316, 2019.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**. v.120 p.105-125, 2018.

BUYONDO, K. A.; KASEDDE, H.; KIRABIRA, J. B. A comprehensive review on kaolin as pigment for paint and coating: Recent trends of chemical-based paints, their environmental impacts and regulation. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 6, p. 100244, 2022.

CHAER, G. M., MENDES, I. C., DANTAS, O. D., MALAQUIAS, J. V., DOS REIS JUNIOR, F. B., & OLIVEIRA, M. I. L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, v. 183, p. 104742, 2023.

CHANG, C. C.; TURNER, B. L. Ecological succession in a changing world. **Journal of Ecology**, v.107, p. 503-509, 2019.

DA SILVA, C. A. D. **Caulim e sua utilização na proteção de algodoeiros contra artrópodes-praga**. Campina Grande: Embrapa Algodão, p. 39 2020. (Documentos / Embrapa Algodão, 281).

DA SILVA, R. R. *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1585–1592, 2010.

DE OLIVEIRA, V. P. *et al.* Are liming and pit size determining for tree species establishment in degraded areas by kaolin mining?. **Ecological Engineering**, v. 178, p. 106599, 2022.

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858–1868, jul. 2010.

DROBNIK, T. *et al.* Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. **Ecological Indicators**, v. 94, p. 151–169, 2018.

FERREIRA, R. de P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. Toxidez de alumínio em culturas anuais. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, p. 25, 2006, (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 63).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World reference base for soil resources 2014 : international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. FAO, 2014.

FRIGHETTO, R.T.S. Análise da biomassa microbiana em carbono: método de fumigação – extração. In: FRIGHETTO, R.T.S.; VALARINI, P.J. (Coords.). Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo: manual técnico. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 198 p. 2000. (EMBRAPA Meio Ambiente – Documentos, 21)

FROUZ, Jan. Soil recovery and reclamation of mined lands. In: STANTURF, J. A.; CALLAHAM JUNIOR, M. A. **Soils and landscape restoration**. 1^oed. Academic Press, 2021. p. 161-191.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, p.383-411, 1986.

GONÇALVES, V. A. *et al.* Biomassa e atividade microbiana de solo sob diferentes sistemas de plantio e sucessões de culturas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1–8, 2019.

GUPTA, S. DAS; KIRBY, W.; PINNO, B. D. Effects of Stockpiling and Organic Matter Addition on Nutrient Bioavailability in Reclamation Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, p. S27-S41, 2019.

IBRAM. **Mineração em Números**. 2022 Disponível em: <https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/> Acesso em: 05 março 2023

ICMBIO. **Instrução Normativa N°11, de 11 de dezembro de 2014**. Estabelecer procedimentos para elaboração, análise, aprovação e acompanhamento da execução de Projeto de Recuperação de Área Degradada ou Perturbada - PRAD, para fins de cumprimento da legislação ambiental. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 12 de dez. de 2014.

IMERYS. **Imerys Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.imerys.com/pt-br/brasil> Acesso em: 05 março 2023

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: A method for measuring biomass. **Soil Biology & Biochemistry**, v.8, p.209-213, 1976.

JOHNSON, D. L. *et al.* Meanings of Environmental Terms. **Journal of Environmental Quality**, v. 26, p. 582–589, 1997.

KARLEN, D. L. *et al.* Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4–10, 1997.

LEMKE, M.; DESALLE, R. The Role of Microbial Ecology in Restoration Ecology in the Age of Genomics: A Summary of the Microbial Ecology Special Issue. **Microbial Ecology**, v. 85, n. 3, p. 1136-1141, 2023.

LI, Y. *et al.* Long-term effects of nitrogen and phosphorus fertilization on soil microbial community structure and function under continuous wheat production. **Environmental Microbiology**, v. 22, n. 3, p. 1066–1088, 2020.

LIMA, A. T. *et al.* The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. **Environmental Science and Policy**, v. 66, p. 227–233, 2016.

MACDONALD, S. E. *et al.* Early trajectories of forest understory development on reclamation sites: Influence of forest floor placement and a cover crop. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 5, p. 698–706, 2015b.

MACDONALD, S. E. *et al.* Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. **New Forests**, v. 46, p. 703-732, 2015a.

MARTINS, W. B. R. *et al.* Ecosystem restoration after bauxite mining: favorable indicators for Tecnosolos construction and soil management using liming and subsoiling. **New Forests**, v. 52, n. 6, p. 971–994, 2021.

MAURYA, Swati *et al.* Indicators for assessment of soil quality: a mini-review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, p. 1-22, 2020.

MELI, Paula *et al.* A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. **Plos one**, v. 12, n. 2, p. e0171368, 2017.

- MENDES, I. DE C.; SOUSA, D. M. G. DE; REIS JUNIOR, F. B. DOS R. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 191–209, 2015.
- MINASNY, B. *et al.* Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**. v. 292, p. 59-86, 2017.
- MOSIER, S.; CÓRDOVA, S. C.; ROBERTSON, G. P. Restoring Soil Fertility on Degraded Lands to Meet Food, Fuel, and Climate Security Needs via Perennialization. **Frontiers in Sustainable Food**., v. 5, p. 706142, 2021.
- MURGUÍA, D. I.; BRINGEZU, S.; SCHALDACH, R. Global direct pressures on biodiversity by large-scale metal mining: Spatial distribution and implications for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 180, p. 409–420, 2016.
- MUSTAPHA, S. *et al.* Potential of using kaolin as a natural adsorbent for the removal of pollutants from tannery wastewater. **Heliyon**, v. 5, n. 11, 1 nov. 2019.
- NOVAK, E. *et al.* Variação temporal dos atributos microbiológicos do solo sob diferentes usos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 603–611, 2018.
- NYAKAIRU, G. W. A. KOEBERL, C.; KURZWEIL, H. The Buwambo kaolin deposit in central Uganda: Mineralogical and chemical composition. **Geochemical Journal**. v. 35, p. 245-356, 2001.
- OLIVEIRA, V. P. de. **A adubação do solo e o tamanho de covas afetam o desempenho de espécies implantadas pós-mineração de caulim e cascalho?** 2021. 76 f. Orientador: Gustavo Schwartz. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021
- ONÉSIMO, C. M. G. *et al.* Ecological succession in areas degraded by bauxite mining indicates successful use of topsoil. **Restoration Ecology**, v. 29, n. 1, p. e13303, 2021.
- OYEBANJO, O.; EKOSSE, G. I.; ODIYO, J. Physico-chemical, mineralogical, and chemical characterisation of cretaceous–paleogene/neogene kaolins within eastern dahomey and niger delta basins from nigeria: Possible industrial applications. **Minerals**, v. 10, n. 8, p. 1–16, 2020.
- PELEJA, V. L. *et al.* Interferência do alumínio no crescimento radicular, absorção e acúmulo de fósforo em plantas de paricá. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 1–8, 2020.

- PEREIRA, D. G. C. *et al.* Potassium chloride: Impacts on soil microbial activity and nitrogen mineralization. **Ciência Rural**, v. 49, n. 5, p. e20180556, 2019.
- PERONI, N.; HENÁNDEZ, M. I. M. **Ecologia de populações e comunidades**. 1º Ed. Florianópolis: CCB/EAD/UFSC, 2011.
- RAMOS, M. R. *et al.* Uso do solo e a estacionalidade climática afetam os atributos biológicos do solo?. **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 1, p. 178-200, 2020.
- ROCHA, F. C. G. *et al.* Chemical and microstructural behaviour of ferruginous rocky outcrops topsoils applied to degraded mining areas. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 35, n. 3, p. 219–234, 2021.
- ROUSEL, J. *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite—1 Symposium; NASA SP-351**. p. 309-317, 1973.
- RUIZ, F. *et al.* Revealing Tropical Tecnossolos as an Alternative for Mine Reclamation and Waste Management. **Minerals**, v. 10, n. 2, p. 110-121, 2020.
- RUIZ, F.; CHERUBIN, M. R.; FERREIRA, T. O. Soil quality assessment of constructed Tecnossolos: Towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. **Journal of Environmental Management**, v. 276, p. 111344, 2020.
- SANTOS, A. E. DE A.; ROSSETTI, D. DE F. Origin of the Rio Capim Kaolin based on optical (petrographic and SEM) data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 26, n. 3, p. 329–341, nov. 2008.
- SANTOS, H G *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 4º ed. Brasília: Embrapa, 2014
- SER. **Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group**. Disponível em: <https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/ser_primer.pdf>.
- SHAH, A. N. *et al.* Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10056–10067, 1 abr. 2017.

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

SILVA, M. DE O. *et al.* Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 2021.

SOUSA, D. J. L. *et al.* Ages and possible provenance of the sediments of the Capim River kaolin, northern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 24, n. 1, p. 25–33, jun. 2007.

SWAINE, M. D.; WHITMORE, T. C. On the definition of ecological species groups in tropical rain forests. **Vegetatio**, v. 75, p. 81-86, 1988.

WHITMORE, T. C. Canopy Gaps and the Two Major Groups of Forest Trees. **Ecology**, v. 70, n. 3, p. 536–538, 1989.

5 PRIMEIRO CAPÍTULO

(Artigo submetido na revista Land Degradation & Development)

QUALIDADE QUÍMICA E FÍSICA DE UM TECNOSSOLO PÓS-MINERAÇÃO DE CAULIM SOB DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO:

A construção de Tecnossolo em áreas de lavra é uma prática que: (I) destina os rejeitos produzidos pela atividade minerária; e (II) recria o relevo e um ambiente para o desenvolvimento de espécies vegetais. Entretanto, a qualidade do Tecnossolo varia de acordo com o material utilizado em sua construção, podendo ter textura extrema (muito argiloso ou muito arenoso), pH extremo (muito ácido ou básico), baixa fertilidade e baixo teor de matéria orgânica. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade química e física de um Tecnossolo após mineração de caulim sob diferentes práticas de recuperação. Para isso, em 2020 foi instalado um experimento na mina Imerys Rio Capim Caulim (IRCC) em Ipixuna do Pará, Brazil com os tratamentos: nucleação (NU), onde foram plantadas as espécies em núcleos formados a partir de restos de galhadas geradas pela supressão vegetal nas áreas de lavra; plantio adensado (PA), onde foram plantadas 3 mudas por m^2 ; plantio florestal (PF), onde foram plantadas 230 mudas no espaçamento de 3 x 3 m; e plantio florestal com calagem (PFC), que possuiu o mesmo sistema de plantio do PF, mas foram aplicadas 2 t ha^{-1} de calcário dolomítico. Além dos tratamentos, foi utilizado uma floresta nativa como referência (FN). Em cada área dos tratamentos foram instaladas quatro parcelas experimentais para coleta de solos nas profundidades 0-10 e 10-20 cm. Foram avaliados como indicadores de qualidade química o: pH, matéria orgânica (MO), potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (AP), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e os indicadores físicos foram: densidade do solo (DS), porosidade total (PT), resistência a penetração (RP), areia, silte e argila. Também foi calculado o índice de qualidade do solo (IQS). Os indicadores físicos foram pouco alterados no Tecnossolo, com exceção de RP, que foi influenciado positivamente por PA. Enquanto para os químicos, o tratamento PFC apresentou valores superiores de pH, Ca, Mg, SB e V, e menor em Al e m. A variável P foi maior em PA. Ao comparar com a área de referência, foi observado maior PT e menor BD e RP em FN. Além disso, a FN foi superior quanto a MO, AP, CTC, P, K, Al, m. Enquanto para o IQS, PFC foi superior no Tecnossolo, mas foi inferior em comparação à FN. Portanto, os tratamentos pouco alteraram a qualidade física do Tecnossolo. Enquanto as químicas foram alteradas positivamente com a aplicação de calcário. Entretanto, as características estudadas ao terceiro ano de recuperação ainda não se aproximam das de FN.

Palavras-chaves: Calagem; Recuperação de área degradada; Índice de qualidade do solo; Nucleação; Método Miyawaki

5 FIRST CHAPTER

(Article submitted to Land Degradation & Development)

CHEMICAL AND PHYSICAL QUALITY OF A POST-KAOLIN MINING TECHNOSOL UNDER DIFFERENT RECOVERY METHODS IN THE EASTERN AMAZON

ABSTRACT:

The construction of Technosols in mining areas is a practice that: (I) disposes of the tailings produced by the mining activity; and (II) recreates the relief and an environment for the development of plant species. However, the quality of the Technosol varies according to the material used in its construction. It can have an extreme texture (very clayey or very sandy), an extreme pH (very acidic or basic), low fertility and low organic matter content. The aim of this work was to assess the chemical and physical quality of a Technosol after kaolin mining under different recovery practices. To this end, an experiment was set up in 2020 at the Imerys Rio Capim Caulim (IRCC) mine in Ipixuna do Pará, Brazil with the following treatments: nucleation (NU), where the species were planted in nuclei formed from the remains of branches generated by plant suppression in the mining areas; dense planting (PA), where 3 seedlings per m² were planted; forest planting (PF), where 230 seedlings were planted at a spacing of 3 x 3 m; and forest planting with liming (PFC), which had the same planting system as PF, but 2 t ha⁻¹ of dolomitic limestone were applied. In addition to the treatments, a native forest was used as a reference (FN). Four experimental plots were set up in each treatment area to collect soil at depths of 0-10 and 10-20 cm. The chemical quality indicators assessed were: pH, organic matter (OM), potassium (K), phosphorus (P), calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al), potential acidity (PA), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), base saturation (V), aluminum saturation (m) and the physical indicators were: soil density (SD), total porosity (TP), penetration resistance (PR), sand, silt and clay. The soil quality index (SQI) was also calculated. The physical indicators were little altered in the Technosol, with the exception of PR, which was positively influenced by PA. As for the chemical indicators, the PFC treatment showed higher values for pH, Ca, Mg, SB and V, and lower values for Al and m. The P variable was higher in PA. Compared to the reference area, there was a higher PT and lower BD and RP in FN. In addition, FN was superior in terms of MO, AP, CTC, P, K, Al, m. While in terms of IQS, PFC was higher in the Technosol, but lower than in FN. Therefore, the treatments had little effect on the physical quality of the Technosol. The chemical quality was positively altered by the application of lime. However, the characteristics studied in the third year of reclamation are still not close to those of FN.

Keywords: Liming; Recovery of degraded areas; Soil quality index; Nucleation; Miyawaki Method

5.1 Introdução

Nas dimensões continentais do Brasil, há uma grande diversidade de reservas minerais exploradas desde a época colonial no século XVII (Ruiz *et al.*, 2023a). Essa riqueza natural contribui para que, na atualidade, o país seja o nono maior produtor de commodities minerais do mundo (Reichl; Schatz, 2024). Por exemplo, foram exportadas 724 mil toneladas de caulim em 2023, com receitas de 97 milhões de dólares (IBRAM, 2024). Embora a mineração seja uma importante atividade econômica no Brasil (Ruiz *et al.*, 2023a), a atividade causa graves perturbações ao ambiente, pois o solo e a cobertura vegetal são completamente removidos (Bradshaw, 1997; Frouz, 2020). Além disso, uma má gestão da alta quantidade de resíduos produzidos, que podem chegar a 100 bilhões de toneladas por ano no mundo (Kaza *et al.*, 2018), representa um grande risco ambiental, social e econômico (Ruiz *et al.*, 2020b), como nos grandes acidentes de Mariana e Brumadinho, ocorridos em 2015 e 2019 no estado de Minas Gerais, Brasil, que geraram elevado custo humano, econômico e ambiental (Ruiz *et al.*, 2023a; Thompson *et al.*, 2020).

Um dos grandes objetivos do século XXI é balancear as necessidades sociais e econômicas com a responsabilidade ambiental (Piccarozzi *et al.*, 2022; Purvis *et al.*, 2019). Em atividades como a mineração, esse é um desafio ainda mais complexo (Ruiz, Cherubin, *et al.*, 2020), especialmente para cumprir a necessidade de consumo e produção sustentável e de proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, respectivamente os objetivos nº 12 e 15 do desenvolvimento sustentável (UN, 2024), visto que os recursos minerais estão principalmente em regiões de alta biodiversidade (Murguía *et al.*, 2016). Em decorrência disso, as áreas de florestas nativa, como a floresta amazônica, estão sujeitas a graves perturbações pela mineração de superfície (Macdonald, Landhäusser, *et al.*, 2015). Nesse contexto, a construção do Tecnossolo é uma técnica que pode ser empregada para a recuperação dessas áreas, e que: (I) pode ser uma alternativa para gestão adequada de resíduos de mineração (Ruiz *et al.*, 2020b) e; (II) restaura a complexidade do relevo, criando um ambiente para estabelecer espécies vegetais (Macdonald *et al.*, 2015b).

Os Tecnossolos possuem propriedades químicas, físicas e microbiológicas definidas pelo material utilizado para construí-lo. Além disso, na escavação, transporte e despejo, a estrutura e as propriedades originais do solo são drasticamente alteradas (Feng *et al.*, 2019), assim como na estocagem, onde o tempo e as condições de armazenamento do material podem alterar a sua qualidade, pois a exposição do solo às condições ambientais altera suas características químicas e

microbiológicas (Gupta; Kirby; Pinno, 2019; Macdonald *et al.*, 2015a). A qualidade do solo está ligada à sua capacidade de sustentar a produtividade e a saúde vegetal e animal (Bünemann *et al.*, 2018; Karlen *et al.*, 1997). Um solo de qualidade é capaz de fornecer serviços ecossistêmicos, como habitat, produção, sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes e regulação da emissão de gases do efeito estufa (Dominati; Patterson; Mackay, 2010). Logo, a avaliação das propriedades do solo é eficaz para monitorar os resultados da restauração ecológica em locais pós-mineração (Imbaná *et al.*, 2024). Além disso, o manejo do Tecnosolo com práticas como calagem, subsolagem e deposição de serapilheira contribui para acelerar o processo de restauração florestal (De Oliveira *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2021; Onésimo *et al.*, 2021; Rocha *et al.*, 2021).

A avaliação da qualidade do Tecnosolo é realizada por meio de indicadores como os químicos e físicos. Os indicadores químicos mostram a capacidade de troca de cátions, salinidade, matéria orgânica, elementos tóxicos e os macros e micronutrientes no solo (Maurya *et al.*, 2020). Esses afetam o desenvolvimento das plantas e a vida no solo por participarem ou inibirem diversos processos e moléculas em plantas e microrganismos (Aide, 2022; de Bang *et al.*, 2021; Y. Li *et al.*, 2020; Maurya *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2019). Já os físicos indicam sobre a porosidade, densidade, textura e o conteúdo de água (Maurya *et al.*, 2020). Esses influenciam diretamente no crescimento radicular, nas trocas gasosas, atividade biológica e a retenção de íons e água no solo (Arshad & Martin, 2002; Shah *et al.*, 2017; Solé *et al.*, 2023; Suuster *et al.*, 2011). Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar se a qualidade química e física de um Tecnosolo oriundo da mineração de caulim é afetada por diferentes métodos de recuperação de áreas degradadas. As hipóteses levantadas são: (1) A aplicação de calcário altera positivamente as características químicas do solo, com a incorporação sendo fundamental para maior eficiência da calagem, logo, espera-se que a qualidade química do Tecnosolo com incorporação de calagem seja melhor do que sem a incorporação e no solo natural; (2) O Tecnosolo é um solo que foi fortemente alterado, perdendo sua estrutura, portanto, sua qualidade física será inferior que a de um solo natural.

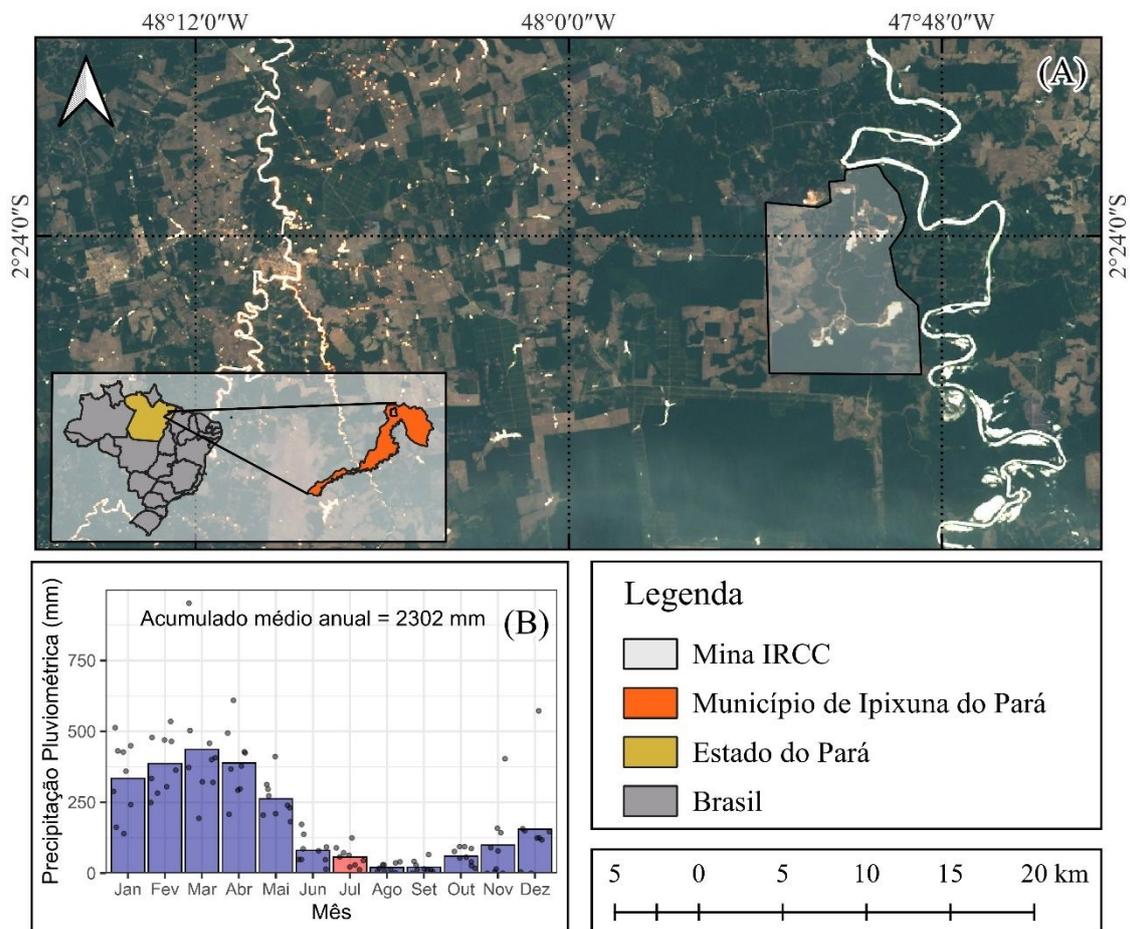
5.2 Material e Métodos

5.2.1 Área de Estudo

O estudo foi conduzido em área de lavra na mina Imerys Rio Capim Caulim (IRCC). A mina está localizada à margem esquerda da bacia do Rio Capim, no Município de Ipixuna do Pará, nordeste do estado do Pará, Brasil (Figura 2, A). A vegetação natural do local é Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e a classe do solo é Latossolo Amarelo (IBGE, 2024). O clima da região é

do tipo Aw, conforme classificação de Köppen e Geiger, com estação seca bem definida, temperatura média anual de 25,3 °C e umidade relativa acima de 80% (Alvares *et al.*, 2013). Em média, a precipitação pluviométrica anual no município é de 2.302 mm, com o período mais chuvoso ocorrendo entre janeiro e maio (precipitação máxima de 437 mm em março) e o período seco entre agosto e setembro (precipitação aproximada de 20 mm em agosto). No mês da coleta de solos (julho/2023), a precipitação foi de 57 mm (Figura 2, B) (ANA, 2024).

Figura 2 - Mapa de localização da mina IRCC (A) e precipitação pluviométrica (B), Ipixuna do Pará, PA, Brasil



Sistema de Coordenadas Geográficas; Datum: Sirgas 2000; base de dados: Amazonia 1 (2023); ANA (2024); IBGE (2021); data da imagem de satélite: 09/30/2023

5.2.2 Delineamento Experimental

O Tecnosolo foi construído com o rejeito do beneficiamento de caulim, composto, sobretudo, por areia, e uma camada de 0,60 m de *topsoil* misturado com estéril. O experimento foi montado em uma área de aproximadamente 1,25 hectares e foi constituído por quatro métodos de recuperação de áreas degradadas (Tabela 1), antes do plantio foi realizada a subsolagem na área

experimental. No tratamento Nucleação, os núcleos formados a partir de restos de galhadas geradas pela supressão vegetal nas áreas de lavra, que foram enriquecidos com espécies arbóreas e o PA foi pelo método Miyawaki (Miyawaki; Golley, 1993), que seleciona espécies nativas de diferentes grupos ecológicos e não nivela o terreno para ter menor entrada de maquinário, com intuito de evitar compactação. Nos tratamentos PF e PFC foi realizado o replantio após dois meses e uma adubação de base com 150 g planta⁻¹ de NK (18-18) + 0,5% boro, 0,5% cobre e 0,5% zinco com aplicação superficial em círculo ou lua cheia a distância de 20 cm da planta. Ademais, uma área de floresta nativa (FN) próxima à área experimental foi selecionada como um ecossistema de referência. As espécies arbóreas utilizadas no plantio dos tratamentos no Tecnosolo estão na Tabela 2, também foi plantado capim do gênero *Brachiaria* sp. em todos os tratamentos. A calagem foi realizada com calcário dolomítico (Poder Relativo de Neutralização Total - PRNT 83%, CaO 33% e MgO 12%) com incorporação em PFC e de superfície em NU e PA, diminuindo entrada de maquinário.

Tabela 1 - Áreas avaliadas na mina IRCC, Ipixuna do Pará, PA, Brasil

Código	Descrição	Substrato	Plantio	Calagem	Adubação	
					SFS	NK (18-18) + 0,5% B + 0,5% Cu + 0,5% Zn
NU	Nucleação	Tecnossolo	Núcleos de 10 m	2 t ha ⁻¹	200g cova ⁻¹	-
PA	Plantio Adensado	Tecnossolo	3 mudas m ²	2 t ha ⁻¹	200g cova ⁻¹	-
PF	Plantio Florestal	Tecnossolo	3 x 3 m	-	300g cova ⁻¹	150g planta ⁻¹
PFC	Plantio Florestal com Calagem	Tecnossolo	3 x 3 m	2 t ha ⁻¹	300g cova ⁻¹	150g planta ⁻¹
FN	Floresta Nativa (Referência)	Latossolo Amarelo	-	-	-	-

NU – nucleação, PA – plantio adensado, PF – plantio florestal, PFC – plantio florestal com calagem, FN – Floresta nativa, SPS – Super Fosfato Simples.

Tabela 2 - Lista de espécies plantadas nos tratamentos no Tecnosolo na mina IRCC, Ipixuna do Pará, PA, Brasil

Tratamentos	Nome Científico	Família	Grupo ecológico
PFC e PF	<i>Clitoria fairchildiana</i> R.A.Howard	Fabaceae	Pioneira
	<i>Inga cayennensis</i> Sagot ex Benth.	Fabaceae	Pioneira
	<i>Inga edulis</i> Mart.	Fabaceae	Pioneira
	<i>Tachigali vulgaris</i> L.F.G.Silva & H.C.Silva	Fabaceae	Pioneira
	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	Malpighiaceae	Pioneira
	<i>Eugenia candolleana</i> DC.	Myrtaceae	Pioneira
NU e PA	<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	Anacardiaceae	Pioneira
	<i>Anacardium occidentale</i> L.	Anacardiaceae	Secundária inicial
	<i>Annona crassiflora</i> Mart.	Annonaceae	Pioneira
	<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D. Don	Bignoniaceae	Pioneira
	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose	Bignoniaceae	Secundária tardia

<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Bignoniaceae	Secundária tardia
<i>Moquilea tomentosa</i> Benth.	Chrysobalanaceae	Secundária inicial
<i>Platonia insignis</i> Mart.	Clusiaceae	Clímax
<i>Cordia goeldiana</i> Huber.	Cordiaceae	Secundária inicial
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Fabaceae	Clímax
<i>Inga edulis</i> Mart.	Fabaceae	Pioneira
<i>Inga cinnamomea</i> Spruce ex Benth.	Fabaceae	Pioneira
<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber ex Ducke) Barneby	Fabaceae	Pioneira
<i>Clitoria fairchildiana</i> R. A. Howard	Fabaceae	Secundária inicial
<i>Cenostigma tocantinum</i> Ducke	Fabaceae	Secundária inicial
<i>Parkia multijuga</i> Benth	Fabaceae	Secundária tardia
<i>Parkia paraensis</i> Ducke	Fabaceae	Secundária tardia
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Forsyth f.	Fabaceae	Clímax
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	Malpighiaceae	Secundária inicial
<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Malvaceae	Clímax
<i>Pachira aquatica</i> Aubl	Malvaceae	Secundária inicial
<i>Carapa guianensis</i> Aubl	Meliaceae	Clímax
<i>Cedrela fissilis</i> Vell	Meliaceae	Secundária tardia
<i>Syzygium cumini</i> (L.) Skeels	Myrtaceae	Pioneira
<i>Syzygium malaccense</i> (L.) Merr. & L.M.Perry	Myrtaceae	Secundária inicial
<i>Pouteria caimito</i> (Ruiz & Pav.) Radlk	Sapotaceae	Secundária inicial
<i>Simarouba amara</i> Aubl	Simaroubaceae	Secundária inicial

NU – nucleação, PA – plantio adensado, PF – plantio florestal, PFC – plantio florestal com calagem.

5.2.3 Coleta de solo

Em julho de 2023, foram estabelecidas quatro parcelas de 25 x 25 m em cada tratamento e na área de referência. Em cada parcela, de modo aleatório e com trado de aço de 10 cm, foram coletadas 10 amostras simples para formação de uma amostra composta nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Além disso, foi coletada uma amostra indeformada com anel volumétrico em cada parcela nas diferentes profundidades.

5.2.4 Análises de solo

As análises químicas foram realizadas com as amostras deformadas, que foram previamente secas em estufa de circulação forçada e peneiradas em peneira de 2 mm (TFSE). O pH foi determinado em solução suspensa de solo e CaCl_2 ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$) na proporção 1:2,5 utilizando o equipamento pHmetro PHOX P1000. O cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e alumínio (Al) foram extraídos com solução de KCl (1 mol L^{-1}), onde o Ca e Mg foram determinados por volumetria de complexação com EDTA ($0,0125 \text{ mol L}^{-1}$), enquanto o Al por volumetria alcalimétrica com NaOH ($0,025 \text{ mol L}^{-1}$). A acidez potencial (AP) foi extraída com solução de acetato de cálcio ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$)

e determinada por volumetria alcalimétrica com NaOH (0,025 mol L⁻¹). O fósforo (P) e o potássio (K) foram extraídos por solução de Mehlich 1 e a determinação do P pelo método colorimétrico com espectrofotômetro UV-M51 da BEL-Photonics no comprimento de onda de 660 μm (Teixeira *et al.*, 2017). A determinação do potássio foi no equipamento MP-AES. A matéria orgânica (MO) foi calculada pela equação 1, após determinação do carbono orgânico do solo (CO) pelo método de Walkley e Black (1934). Além disso, foram calculados os valores da soma de base (SB), capacidade de troca de cátions potencial (CTC), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

$$MO = CO \times 1,724 \quad (1)$$

Onde: CO é o carbono orgânico do solo e o valor 1,724 refere-se ao fator de transformação de CO para MO (fator de Van Bemmelen).

A análise de granulometria foi realizada com as amostras deformadas (TFSE) pelo método da pipeta (Gee; Bauder, 1986). O método consiste na separação das frações do solo com uso de um dispersante (NaOH 1 mol L⁻¹) e, posteriormente, determinar as suas massas. Para isso, foi utilizado 10 ml de dispersante em 40 g de solo. Foi usado uma peneira de 0,2 mm para reter a fração areia do solo, enquanto as frações argila e silte são separadas por sedimentação em uma proveta de 1 L. Foi retirada uma alíquota de 25 ml da suspensão que foi levada a estufa na temperatura de 105 °C por 24 h para determinar a massa da argila. A fração de silte é determinada pela subtração da massa de silte e argila do valor de referência (1000 g kg⁻¹).

A densidade do solo (DS) foi determinada pelo método do “anel volumétrico” utilizando o trado Uhland, onde o valor de cada amostra foi obtido por meio da relação da massa de solo seco não perturbada inserida em cilindro metálico, e o volume cilíndrico, equação 2. O solo foi seco a uma temperatura de 105 °C por 24 horas em estufa de circulação forçada. Com a DS foi calculado a porosidade total (PT), equação 3 (Teixeira *et al.*, 2017).

$$DS = \frac{m_s}{V_{anel}} \quad (2)$$

Onde: DS é a densidade do solo, m_s é a massa do solo seco e V_{anel} = volume do anel.

$$PT = \left(1 - \frac{DS}{DP}\right) 100 \quad (3)$$

Onde: PT é a porosidade total, DA é a densidade do solo e DP é a densidade da partícula ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$).

A resistência à penetração (RP) foi determinada com auxílio do penetrômetro Falker modelo penetrológ PLG 1020, que obteve dados de resistência à penetração da profundidade de 0,05 cm a 20 cm. Foram realizadas 15 medidas de resistência para cada profundidade e tratamento, assim, obtendo o valor médio representativo do tratamento por profundidade.

5.2.5 Índice de Qualidade do Solo

Para calcular o Índice de qualidade do solo (IQS), foi utilizada a linguagem R (R Core Team, 2023). O cálculo do IQS foi constituído por três etapas. Na primeira, foi definido o conjunto mínimo de dados (MDS). Para isso, foram removidas as variáveis secundárias (Silte, PT, SB, CTC, V e m) do conjunto de 19 variáveis químicas e físicas avaliadas a fim de evitar comunalidade. Além disso, foi realizado o teste de Kaiser–Meyer–Oklin (KMO), para o qual as variáveis com $KMO < 0,50$ foram eliminadas, resultando em uma matriz de 11 variáveis. A matriz de dados foi utilizada na análise de componentes principais (ACP), onde foram selecionados os componentes principais (CP) com autovalores (≥ 1) (Andrews; Karlen; Mitchell, 2002), pois esses CPs possuem menos variação que aquelas geradas por uma variável (Vasu *et al.*, 2016). Os CPs selecionados foram submetidos à rotação varimax, com intuito de aumentar a correlação entre as variáveis do solo e a CP (Waswa *et al.*, 2013). Foi realizada a correlação de Spearman com as variáveis MDS. Quando as variáveis possuíam uma alta correlação ($\rho \geq 0,7$) na mesma CP, a variável de menor carga fatorial era eliminada (Andrews; Karlen; Mitchell, 2002). Desse modo, se evitava a redundância entre as variáveis selecionadas (Vasu *et al.*, 2016). Por fim, foram realizadas novamente a ACP para reavaliar os componentes principais (Tabela 3), a rotação varimax e a correlação de Spearman.

Tabela 3 - Resultado da análise de componentes principais

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
Desvio Padrão	1,9145	1,3961	0,76068	0,68824	0,43132	0,33953	0,17817
Proporção de Variância	0,5236	0,2784	0,08266	0,06767	0,02658	0,01647	0,00453
Proporção cumulativa	0,5236	0,8021	0,88475	0,95242	0,97900	0,99547	100,000

Na segunda etapa, foram realizadas as pontuações lineares, onde as variáveis eram classificadas em ordem crescente ou decrescente em concordância se valores altos eram considerados “bons” ou “ruins” (Andrews; Karlen; Mitchell, 2002). As observações das variáveis que foram classificadas como: “mais é melhor”, foram divididas pelo valor mais alto, logo, para a

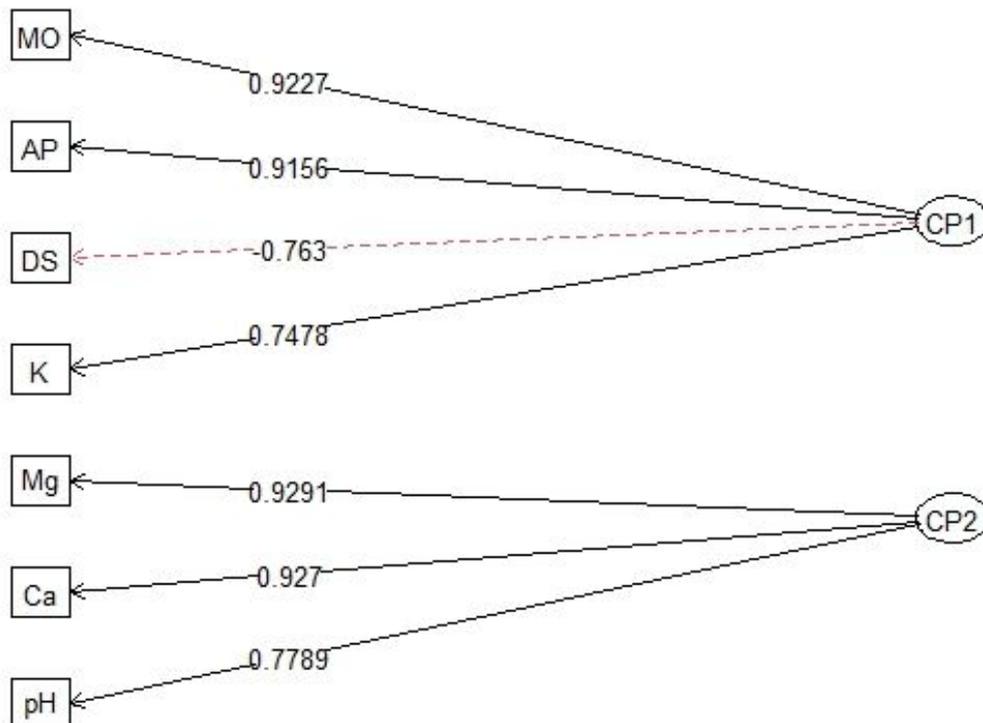
observação de maior valor, foi atribuída a pontuação de 1. Enquanto as que foram classificadas como: “menos é melhor”, a observação de menor valor era dividida por cada observação, sendo a ela atribuída a pontuação de 1. Para a variável pH, a pontuação empregada foi classificada como: “mais é melhor até 6,5” (Liebig; Varvel; Doran, 2001).

Na terceira etapa, foram calculadas as ponderações das variáveis com base nos resultados da ACP. Para gerar o fator de ponderação, o percentual explicado de variância de cada CP foi dividido pela porcentagem de variância cumulativa das CPs com autovalor >1 (Tabela 3) (Ray *et al.*, 2014). Além disso, se mais de uma variável tivesse grande carga em uma CP (Figura 2), o fator de ponderação seria dividido igualmente (Ahirwal *et al.*, 2018). Em seguida, o IQS foi calculado pela equação 4 de índice aditivo ponderado (Andrews; Karlen; Mitchell, 2002).

$$IQS = \sum_{i=1}^n W_i S_i(4)$$

Onde o IQS é o índice de qualidade do solo, W_i é fator de ponderação e S_i = pontuação de cada observação.

Figura 3 - Diagrama com as variáveis e suas cargas retidas nas componentes principais



CP – Componente principal, MO – matéria orgânica, AP – acidez potencial, DS – Densidade do solo, K – potássio, Mg – Magnésio, Ca – Cálcio, pH – potencial hidrogeniônico.

5.2.6 Análise de dados

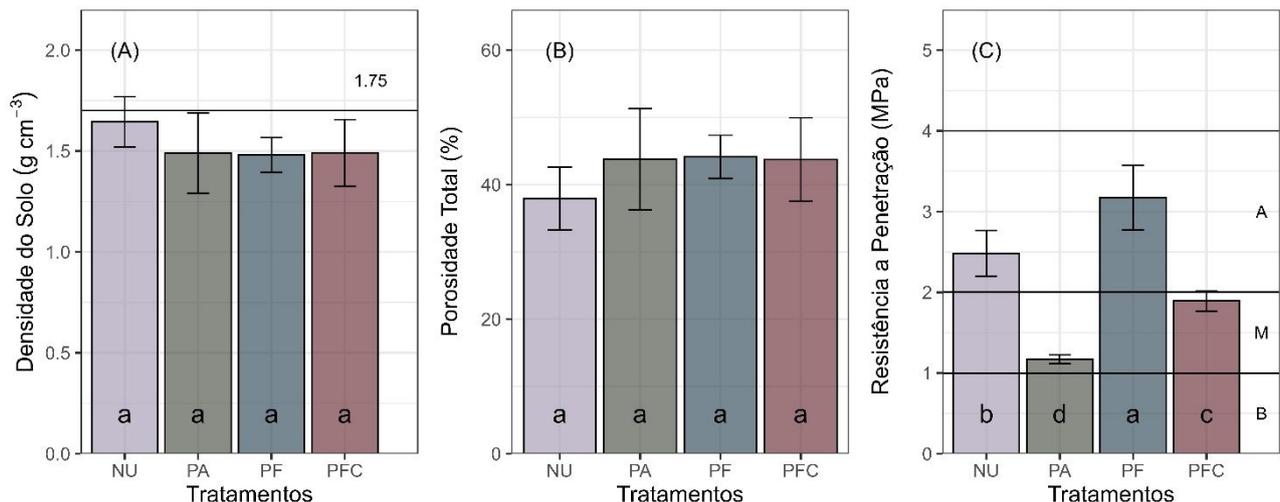
A análise de dados foi realizada na linguagem R versão 4.3.1 (R Core Team, 2023). A normalidade e a homoscedasticidade dos dados foram avaliadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. As variáveis que não atenderam os pressupostos da análise de variância (ANOVA) foram transformadas pelo método Box-Cox. As diferenças entre os tratamentos e entre os tratamentos e o ecossistema de referência (FN) para as variáveis foram avaliadas pela análise de variância ($p < 0,05$) e, quando significativa, foi utilizado o teste de Tukey ($p < 0,05$) para a comparação dos tratamentos no Tecnosolo e o teste de Dunnett ($p < 0,05$) para comparar os tratamentos no Tecnosolo com o ecossistema de referência (Latosolo Amarelo). Além disso, em cada profundidade foi realizada a análise de correlação de Spearman e a análise de componentes principais (ACP), onde as variáveis que não se correlacionaram à outras variáveis foram eliminadas.

5.3 Resultados

5.3.1 Tratamentos no Tecnosolo

A RP foi afetada pelos tratamentos no Tecnosolo (p -valor $< 0,01$), sendo que o padrão encontrado foi $PF > NU > PFC > PA$ com valores respectivos de 3,17, 2,48, 1,89, 1,17 MPa (Figura 4, C). Densidade do Solo e Porosidade Total não sofreram influência dos tratamentos.

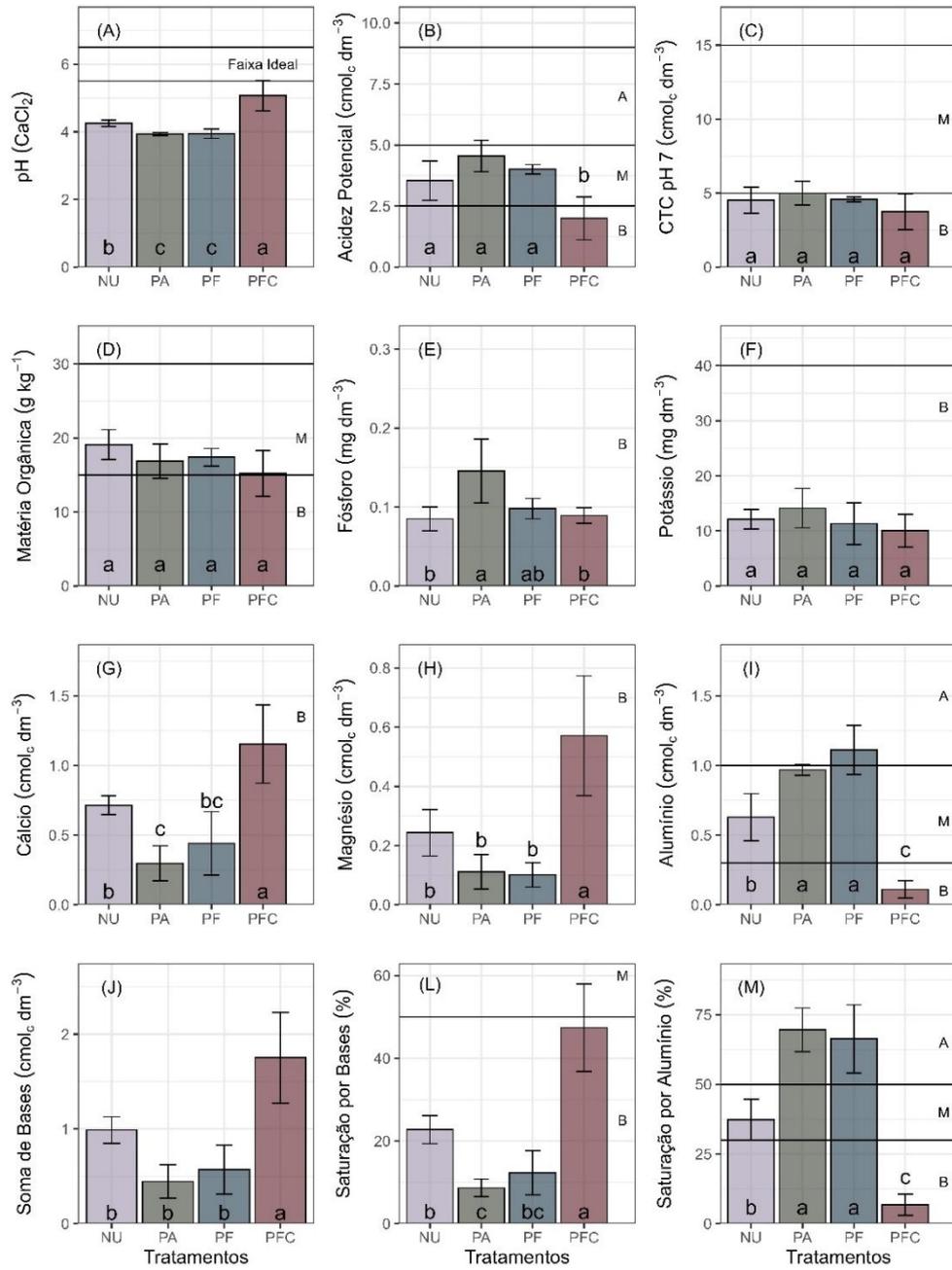
Figura 4 - Comparação dos indicadores de qualidade físico entre os tratamentos no Tecnosolo



As barras seguidas de letras diferentes são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); as linhas verticais representam o erro padrão ($n=4$); Linha horizontal no eixo y é o limite de classe; L = Baixo, M = Médio, H = Alto. NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

As variáveis matéria orgânica, CTC pH 7 e potássio não diferiram estatisticamente, enquanto o pH, acidez potencial, fósforo, cálcio, magnésio, alumínio, soma de bases, saturação por bases e saturação por alumínio variaram com os tratamentos no Tecno solo. pH variou de acordo com $PFC > NU > PA = PF$ (Figura 5, A, p-valor $< 0,01$); P (Figura 5, E, p-valor $< 0,01$): $PA \geq PF = PFC = NU$; Al (Figura 5, I, p-valor $< 0,01$) e saturação por alumínio (Figura 5, M, p-valor $< 0,01$): $PA = PF > NU > PFC$; Mg (Figura 5, H, p-valor $< 0,01$) e soma de bases (Figura 5, J, p-valor $< 0,01$) mostraram o padrão: $PFC > NU > PA = PF$; e Ca (Figura 5, G, p-valor $< 0,01$) e saturação por bases (Figura 5, L, p-valor $< 0,01$): $PFC > NU \geq PF = PA$.

Figura 5 - Comparação dos indicadores de qualidade químicos entre os tratamentos no Tecnosolo



As barras seguidas de letras diferentes são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); as linhas verticais representam o erro padrão ($n=4$); Linha horizontal no eixo y é o limite de classe; L = Baixo, M = Médio, H = Alto. NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

5.3.2 Tratamentos no Tecnosolo x floresta nativa

Foi observada diferença significativa para as classes texturas do solo entre os tratamentos e FN. Para o teor de argila e de silte, a área de FN apresentou valor superior que os tratamentos no Tecnosolo. Enquanto os teores de areia nos tratamentos foram maiores que em FN (Tabela 4).

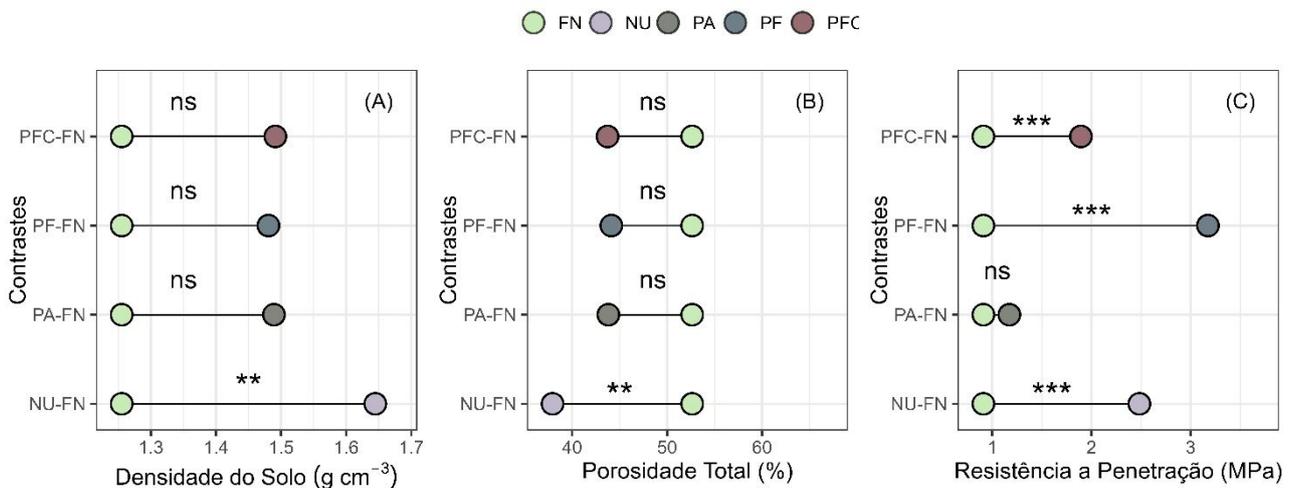
Tabela 4 - Comparação da textura de um Latossolo Amarelo (FN) e um Tecnosolo sob diferentes métodos de recuperação

Tratamentos	g kg ⁻¹			Classificação
	Argila	Silte	Areia	
FN	384 ± 21,8	95 ± 3,9	521 ± 25,5	Argilo Arenoso
NU	317 ^{ns} ± 12,9	53 ^{***} ± 4,0	630 ^{**} ± 9,0	Franco Argilo Arenoso
PA	219 ^{***} ± 69,3	40 ^{***} ± 6,0	741 ^{***} ± 66,2	Franco Argilo Arenoso
PF	240 ^{***} ± 23,6	65 ^{***} ± 2,5	695 ^{***} ± 24,7	Franco Argilo Arenoso
PFC	256 ^{***} ± 14,5	74 ^{***} ± 8,3	669 ^{***} ± 10,8	Franco Argilo Arenoso
cv (%)	23,71	31,98	12,78	

Os valores médios ($n = 4$) seguida de *, **, *** são significativamente diferentes pelo teste de Dunnett com p-valor menor 0,05, 0,01, 0,001 e ns de não significativo. FN – Florestal Nativa, NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

Para as variáveis densidade (Figura 6, A) e porosidade (Figura 6, B), o contraste NU-FN foi significativo, com FN apresentando o menor e maior valor, respectivamente. Para resistência a penetração (Figura 6, C) os contrastes PFC-FN, PF-FN, NU-FN foram significativos; FN apresentou menor em todos os contrastes.

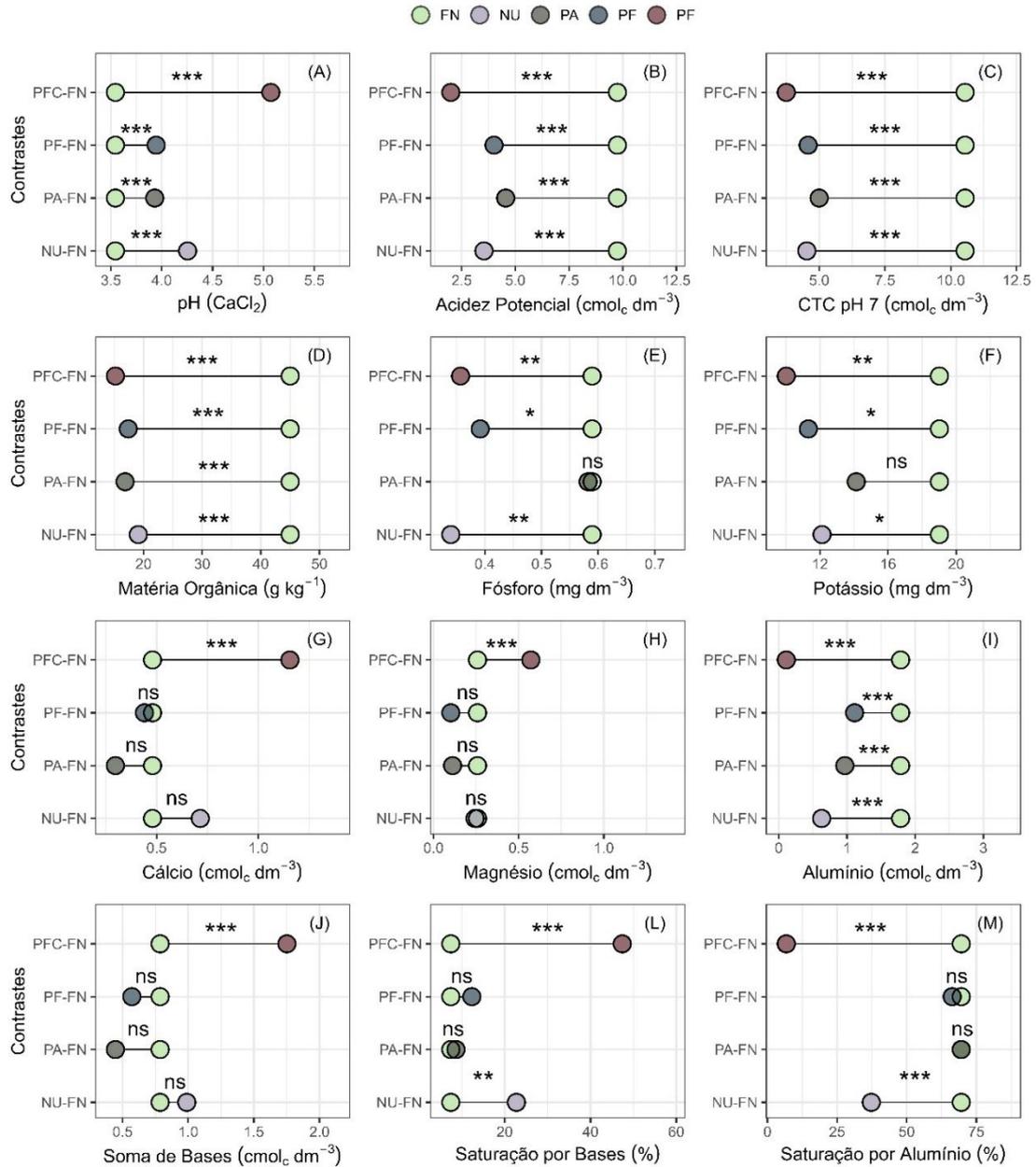
Figura 6 - Comparação dos indicadores de qualidade físico entre os tratamentos no Tecnosolo com a floresta nativa



Os contrastes seguidos de *, **, *** são significativamente diferentes pelo teste de Dunnett com p-valor menor 0,05, 0,01, 0,001 e ns de não significativo. FN – Florestal Nativa, NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

O pH (Figura 7, A), acidez potencial (Figura 7, B), CTC (Figura 7, C), matéria orgânica (Figura 7, D) e alumínio (Figura 7, I) apresentaram todos os contrastes significativos. A FN apresentou os maiores valores nos contrastes em todas as variáveis, exceto para o pH, no qual a floresta apresentou menores valores. Fósforo (Figura 7, E) e potássio (Figura 7, F) apresentaram os contrastes PFC-FN, PF-FN e NU-FN significativos; os maiores valores foram registrados para a floresta nativa. Cálcio (Figura 6, G), magnésio (Figura 7, H) e soma de bases (Figura 7, J) registraram efeitos significativos somente nos contrastes PFC-FN e os menores valores foram encontrados na floresta nativa. Por fim, saturação por bases (Figura 7, L) e saturação por alumínio (Figura 7, M) detectaram que os contrastes PFC-FN e NU-FN foram significativos. Para saturação por bases, os menores valores foram os da floresta, enquanto a saturação por alumínio, o comportamento foi o inverso, os maiores valores foram os da floresta.

Figura 7 - Comparação dos indicadores de qualidade químicos entre os tratamentos no Tecnessolo com a floresta nativa



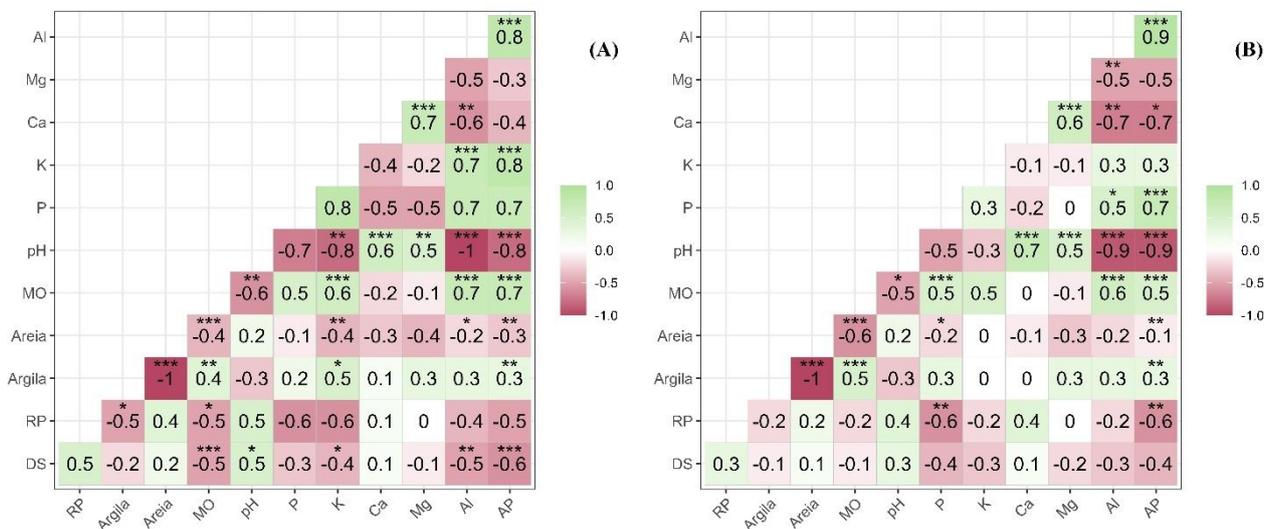
Os contrastes seguidos de *, **, *** são significativamente diferentes pelo teste de Dunnett com p-valor menor 0,05, 0,01, 0,001 e ns de não significativo. FN – Floresta Nativa, NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

5.3.2 Correlação entre as variáveis

A correlação entre os indicadores de qualidade do solo foi avaliada para cada profundidade. Na profundidade de 0-10 cm (Figura 8, A), 29 correlações foram significativas das

66 possíveis. Das quais, Al-AP, Ca-Mg, K-Al, K-AP, pH-Ca, pH-Mg, MO-K, MO-Al, MO-AP, argila-MO, argila-K, argila-AP e DS-pH foram correlações positivas. Enquanto as Ca-Al, pH-K, pH-Al, pH-AP, MO-pH, areia-MO, areia-K, areia-Al, areia-AP, argila-areia, RP-argila, RP-MO, DS-MO, DS-K, DS-Al e DS-AP foram negativas. Já na profundidade de 10-20 cm (Figura 8, B), 23 correlações foram significativas. As correlações positivas foram Al-AP, Ca-Mg, P-Al, P-AP, pH-Ca, pH-Mg, MO-P, MO-Al, MO-AP, argila-MO e argila-AP. Os negativos foram Mg-Al, Ca-Al, Ca-AP, pH-Al, pH-AP, MO-pH, areia-MO, areia-P, areia-AP, argila-areia, RP-P, RP-AP.

Figura 8 – Correlação de Spearman dos indicadores de qualidade do solo na profundidade de 0-10 cm (A) e na de 10-20 cm (B).



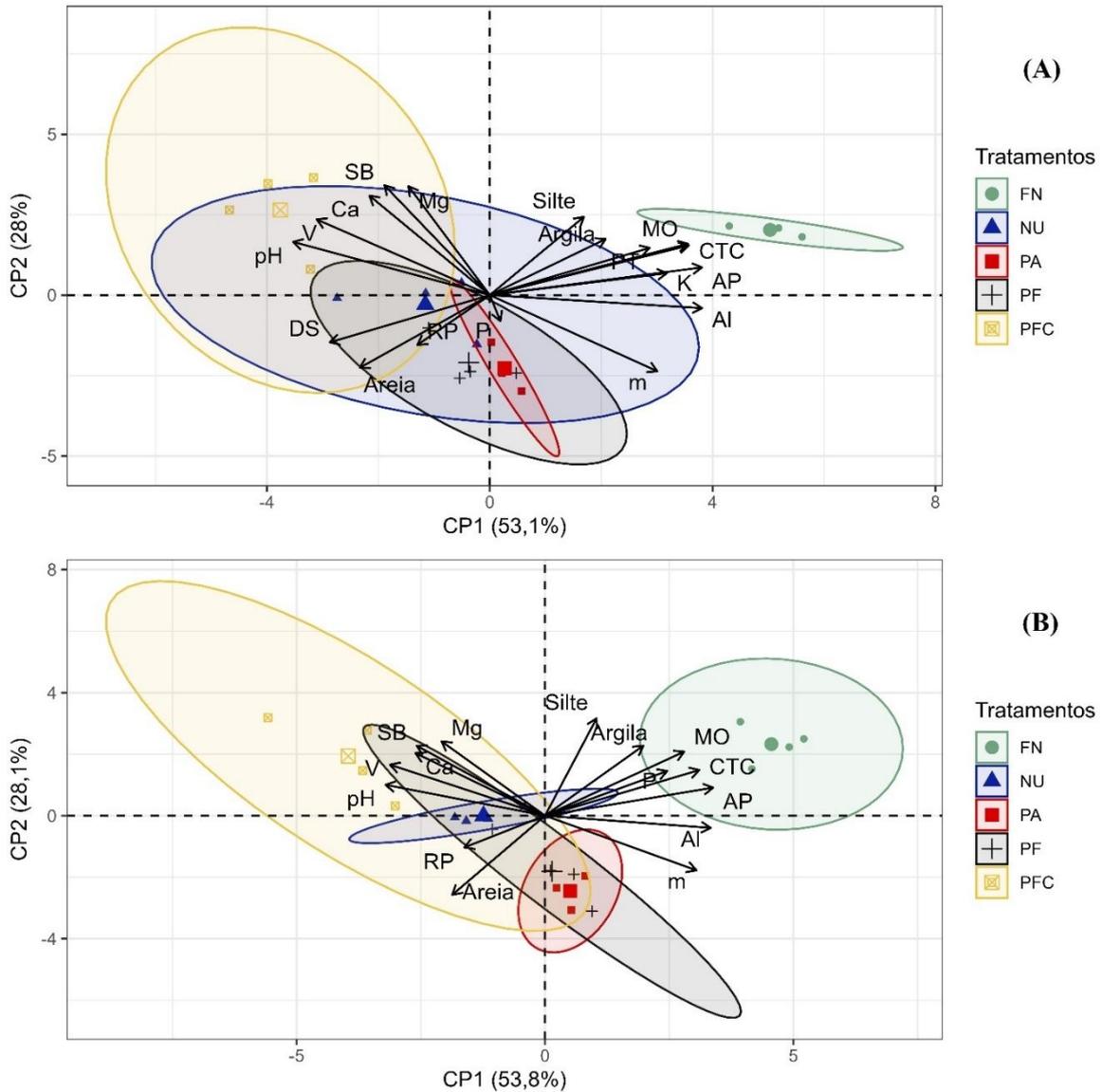
*, **, *** são correlações significativas com o p-valor menor 0,05, 0,01, 0,001. Densidade aparente (BD), resistência à penetração (RP), argila, areia, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (AP).

5.3.3 Análise de componentes principais (ACP)

Os tratamentos no Tecnosolo se diferenciaram da área de referência em ambas as profundidades. Os componentes 1 e 2 explicaram 53,1% e 28% na profundidade de 0-10 cm, e na de 10-20 cm 53,8% e 28,1%, respectivamente (Figura 9). Em ambas as profundidades, o FN se localizou nas coordenadas positivas de CP1 e CP2, associando às variáveis argila, silte, MO, PT, CTC, K, AP e Al. As mesmas variáveis foram associadas a FN na segunda profundidade, exceto PT e com o acréscimo de P. Já os tratamentos no PA e PF se localizaram mais nas coordenadas negativas da CP1 e positivas da CP2, o tratamento NU ficou centralizado ao eixo cartesiano da ACP e o PFC ficou mais para as coordenadas positivas do CP1 e negativa do CP2. De maneira geral, as

variáveis DS e areia, na primeira profundidade, e RP e areia, na segunda profundidade, estão associadas ao Tecno solo. Além disso, as variáveis pH, V, Ca, SB e Mg estão fortemente associadas ao tratamento PFC em ambas as profundidades.

Figura 9 – Análise de componentes principais dos indicadores de qualidade do solo na profundidade de 0-10 cm (A) e na de 10-20 cm (B).



Densidade aparente (DS), porosidade total (PT), resistência à penetração (RP), argila, silte, areia, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (AP), Capacidade de troca catiônica potencial (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m). FN – Florestal Nativa, NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

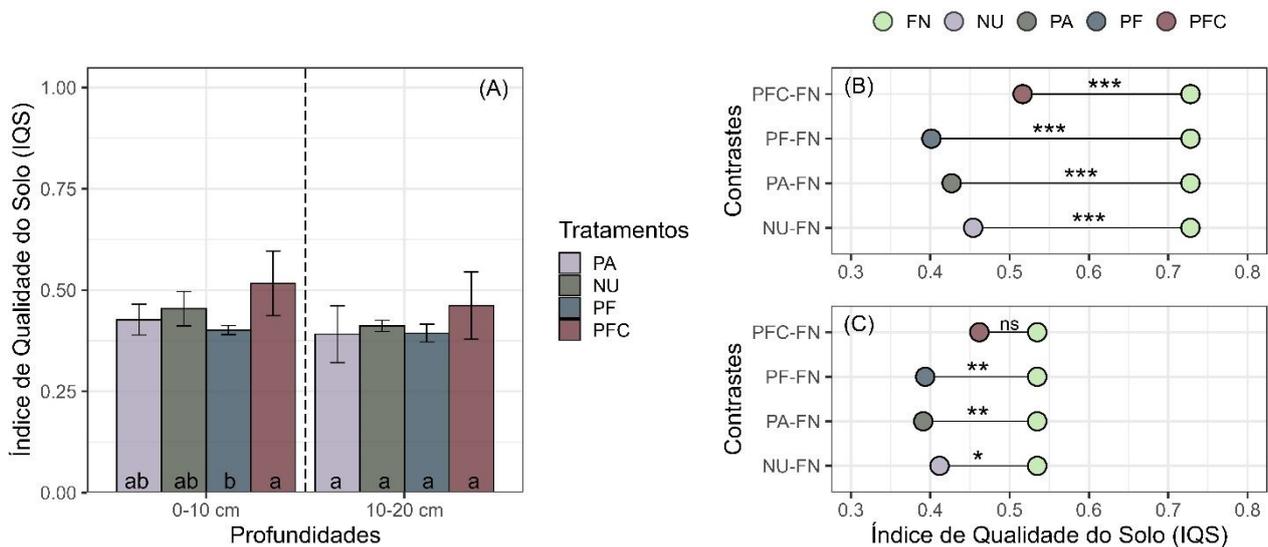
5.3.4 Índice de qualidade do solo

No presente trabalho, as variáveis matéria orgânica, acidez potencial, densidade do solo, potássio, magnésio, cálcio e pH foram selecionadas para compor o índice com base (equação 10) em duas CPs com alto autovalor (Figura 3). O índice de qualidade do solo (IQS) variou em função dos tratamentos no Tecnosolo na camada 0-10 cm do solo (p -valor = 0,034) e o padrão encontrado foi $PFC \geq PA = NU \geq PF$ (Figura 9, A). Para a profundidade 10-20 cm não foram detectadas diferenças entre os tratamentos.

$$SQI = MO \times 0.1632 + AP \times 0.1632 + DS \times 0.1632 + K \times 0.1632 + Mg \times 0.1157 + Ca \times 0.1157 + pH \times 0.1157 \quad (5)$$

Para o índice de qualidade do solo, na camada 0-10 cm, todos os contrastes foram significativos (Figura 10, B); NU-FN; PA-FN; PF-FN e PFC-FN os valores foram maiores na floresta. Na camada 10-20 cm (Figura 10, C), os contrastes NU-FN, PA-FN, PF-FN foram significativos.

Figura 10 – Comparação entre tratamentos (A) e cada tratamento com a floresta nativa para profundidade de 0-10 cm (B) e 10- 20 cm (C) para o índice de qualidade do solo.



As barras seguidas de letras diferentes são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); as linhas verticais representam o erro padrão ($n=4$); os contrastes seguidos de *, **, *** são significativamente diferentes pelo teste de Dunnett com p -valor menor 0,05, 0,01, 0,001 e ns de não significativo. FN – Florestal Nativa, NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

5.4 Discussão

5.4.1 Qualidade Física do Tecossolo sob diferentes técnicas de recuperação de área degradada.

Nas profundidades estudadas, o Tecossolo foi classificado na classe textural Franco Argilo Arenoso e o Latossolo Amarelo da área de floresta nativa foi como Argilo Arenoso, conforme o sistema taxonômico internacional (UDSA, 2017). A menor quantidade de partículas finas (argila e silte) nos tratamentos em comparação com a floresta nativa, se deve ao transportado, armazenamento e a camada superficial é misturada com solo de maior profundidade usado para construir o Tecossolo (Ahirwal; Maiti, 2018; Feng *et al.*, 2019). Contudo, é importante salientar que as texturas muito arenosa ou muito argilosa são amplamente relatadas como um problema inerente ao Tecossolo (Frouz, 2020). Em um Tecossolo pós-mineração de carvão na Índia, foi observada uma menor quantidade de argila na textura em comparação com área de floresta nativa mesmo após 16 anos (Ahirwal; Maiti, 2018). De maneira geral, isso é decorrente do fato de que a textura do solo é um indicador que pouco se altera com manejo (Arshad; Lowery; Grossman, 1997; Karaca *et al.*, 2021; Levi *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2023). Entretanto, a avaliação da textura é importante para um manejo adequado do solo, pois a argila é parte da fração coloidal do solo e, solos com menor teor de argila terá uma menor capacidade de reter água e nutriente, baixo teor de carbono orgânico e baixo ponto de murcha permanente (Budiyanto, 2021; Huang; Hartemink, 2020; Imbaná *et al.*, 2024), ou seja, solos arenosos, tem menor capacidade de armazenamento, logo, ocorre a lixiviação de nutrientes à medida que a água é drenada (Moral; Rebollo, 2017). Nesse sentido, a eficiência no uso de insumos no Tecossolo pode ser afetada pela textura.

Para a classe textura do Tecossolo (Franco Argilo Arenoso), os valores médios da densidade do solo foram considerados abaixo do valor crítico ($1,75 \text{ g cm}^{-3}$) para restrição de raízes (Arshad; Lowery; Grossman, 1997), apesar de estarem próximos do limite. Esse resultado pode ser em decorrência da subsolagem realizada no Tecossolo antes do plantio, visto que essa prática diminui a compactação do solo (Gonçalves *et al.*, 2017). A densidade do solo é um importante parâmetro por medir o grau de compactação do solo e influenciar diretamente na porosidade total (Suuster *et al.*, 2011), afetando conseqüentemente a retenção de água, de nutrientes e no enraizamento de plantas. Entretanto, com o aumento da idade da recuperação, a densidade do Tecossolo tende a diminuir, pois há o desenvolvimento de raízes, deposição de serapilheira, acúmulo de matéria orgânica e o aumento da umidade (Ahirwal *et al.*, 2018). Em relação a resistência à penetração, os valores médios variaram entre as classificações: média, em PFC e PA, e

alta em PF e NU (Arshad; Lowery; Grossman, 1997). O fato que no tratamento PA tenha sido priorizado a pouca entrada de maquinário pode ter contribuído para a menor resistência a penetração, visto que a movimentação contínua de equipamentos pesados causa compactação (Ahirwal *et al.*, 2018). Além do mais, o calcário incorporado pode explicar uma menor resistência em PFC, visto que o cálcio e o magnésio podem influenciar na estrutura do solo, por promover a criação de agregados (Fernández *et al.*, 2019). Elevados valores (acima de 2 MPa) de resistência a penetração afetam o enraizamento das plantas (Gonçalves *et al.*, 2017; Taylor; Roberson; Parker, 1966), isso ocorre, pois, a resistência é diretamente relacionada ao trabalho realizado para o sistema radicular penetrar no solo (Shah *et al.*, 2017). Em solos com alta resistência a penetração, o desenvolvimento inicial das plantas utilizadas no reflorestamento poderá ser prejudicado (Solé *et al.*, 2023). Logo, os resultados deste estudo sugerem que o PFC e PA são as práticas de restauração florestal mais adequadas para o favorecimento do enraizamento das plantas, com o PA sendo o que mais se aproxima, em termos de resistência à penetração de raízes, do solo em condições naturais.

5.4.2 Qualidade química do Tecnosolo sob diferentes técnicas de recuperação de área degradada

Os efeitos positivos da calagem são amplamente descritos na literatura (De Oliveira *et al.*, 2022; Mokolobate; Haynes, 2002; Olaya-Montes *et al.*, 2021; Quintal *et al.*, 2017). Ademais, a aplicação superficial do calcário tem uma eficiência menor com o aumento da profundidade, principalmente que quando comparado ao incorporado em curto período de avaliação (3 anos), sendo seu efeito restrito à poucos centímetros no solo, por ser mais lento na mitigação da acidez do solo (Bortolanza; Klein, 2016; dos Santos *et al.*, 2018), isso justifica o pouco efeito nos tratamentos NU e PA. No presente estudo, o pH no Tecnosolo aumentou com a aplicação do calcário incorporado, mas os valores médios ficaram abaixo da faixa ideal (5,5 e 6,5) (Brasil; Cravo; Viégas, 2020). Em um estudo anterior na mesma área, o pH também foi menor que 5,5 com a aplicação de 2 t ha⁻¹ no Tecnosolo com a incorporação de calcário (De Oliveira *et al.*, 2022). Entretanto, o uso de calcário incorporado foi eficiente em insolubilizar a maior parte do alumínio do Tecnosolo. No tratamento PFC os valores de alumínio trocável, acidez potencial e saturação por alumínio foram baixos, enquanto na área com a aplicação de calcário em superfície (NU e PA) foi médio e alto em PF, onde não foi realizada a calagem, para essas variáveis (Brasil; Cravo; Viégas, 2020; Ribeiro; Guimarães; Venegas, 1999; Sobral *et al.*, 2015). Em solos tropicais, como os amazônicos, a alta precipitação e o intemperismo do material de origem a longo prazo torna-os naturalmente ácidos e com altos teores de alumínio (Olaya-Montes *et al.*, 2021; Quintal *et al.*, 2017). Esse é o caso do solo da área de estudo, cujo material de origem (caulim) é rico em caulinita, um mineral 1:1 constituído

por uma lâmina de sílica (SiO_2) unida por oxigênio e lâmina octaédrica de alumínio (Al_2O_3) (Mustapha *et al.*, 2019). Nesses solos, a correção para insolubilizar o alumínio é fundamental para o sucesso do plantio (Aide, 2022) em decorrência dos seus efeitos negativos no enraizamento de plantas, por reduzir o alongamento do sistema radicular (Aide, 2022; Kopittke *et al.*, 2016; Kopittke; Blamey, 2016).

Além da calagem, a deposição de resíduos orgânicos pode ter contribuído para redução nos teores de alumínio, da acidez potencial e, conseqüentemente, do aumento do pH em NU (Mokolobate; Haynes, 2002), pois os compostos orgânicos podem formar complexos orgânicos com o alumínio e o ferro, causando o aumento no pH (Castán *et al.*, 2016). Com isso, sugere-se que esse resultado é atribuído à elevada deposição de material orgânico na construção dos núcleos por meio da galhada oriunda da supressão vegetal. Nos trabalhos de Laurent *et al.* (2020) e Lipiec *et al.* (2021) também foi relatado o aumento no pH após aplicação de compostos orgânicos em solos arenosos.

Em geral, macronutrientes como cálcio, magnésio, potássio e fósforo foram encontrados em baixa concentração nos tratamentos de Tecnosolo (Brasil; Cravo; Viégas, 2020). A textura do solo arenosa e a alta precipitação pluviométrica da região amazônica tornam o ambiente propício para a perda desses nutrientes por escoamento superficial e lixiviação (Ukwattage *et al.*, 2020). Entretanto, é importante destacar que a calagem em PFC obteve efeito positivo para o cálcio e o magnésio, refletindo nos maiores valores de soma de bases e saturação por bases. Isso pode ser explicado pela substituição dos íons de Al^{+3} e H^+ pelos de Ca^{+2} e Mg^{+2} , que ocupam as cargas da fração coloidal do solo (Junior *et al.*, 2020), aumentando a soma de bases e saturação por bases no Tecnosolo (Ruiz; Cherubin; Ferreira, 2020). Contudo, mesmo com aumento da saturação por bases, os valores médios foram baixos (Sobral *et al.*, 2015). Esses nutrientes são essenciais para as plantas, o cálcio é um elemento estrutural que confere rigidez e estabilidade ao sistema da parede celular, o elemento é requerido para o alongamento e divisão celular mitótica na forma de pectatos de cálcio nas raízes, ou seja, o cálcio é fundamental para o crescimento radicular (de Bang *et al.*, 2021; Maathuis, 2009; Prado, 2008). Já o magnésio é uma das principais moléculas constituintes da clorofila, assim, sua ausência afeta indiretamente a fotossíntese (Prado, 2008). Portanto, resultados desta pesquisa mostram que a calagem com incorporação é essencial para melhorar a disponibilidade de cálcio e magnésio para promover melhores condições, em termos nutricionais para o desenvolvimento das plantas.

Os elementos como potássio e fósforo geralmente são encontrados em baixa quantidade em Tecnosolo mesmo ao longo do tempo (Čížková *et al.*, 2018). No caso do potássio, o elemento é facilmente lixiviado em solos com baixa capacidade de reter nutrientes em períodos de alta precipitação pluviométrica (LU *et al.*, 2022), assim como o fósforo, que, sua fração disponível para as plantas, também é perdido por escoamento superficial em solos arados arenosos (Ukwattage *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2005), principalmente o fósforo oriundo de adubação inorgânica (Kang *et al.*, 2011). Porém, no geral, a fertilidade no Tecnosolo é dependente principalmente da natureza do resíduo utilizado na sua construção e não de adubações com fertilizantes (Ruiz *et al.*, 2020a), o que é reforçado pelo fato que o tratamento PA se igualou a PF e teve maior teor de fósforo que PFC, pois nesses tratamentos (PFC e PF) foram aplicadas maiores quantidades de superfosfato simples em relação ao PA. Portanto, atribui-se o resultado à variabilidade espacial do elemento no Tecnosolo. Em estudo sobre a variabilidade espacial do fósforo em Tecnosolo arenoso, foi observado uma alta variabilidade do elemento em áreas com menos de quatro anos (Betancur-Corredor *et al.*, 2023). Contudo, é importante destacar que o fósforo e o potássio são nutrientes essenciais para a qualidade do solo e para as plantas. O fósforo, por exemplo, desempenha função importante nas reações luminosas da fotossíntese, onde a luz absorvida aciona a cadeia de transporte da cadeia tilacoide para formar ATP e NADPH, que posteriormente será usado para converter CO₂ em carboidrato no estroma do cloroplasto nas reações escuras, enquanto o potássio tem importante participação como ativador enzimático (de Bang *et al.*, 2021).

A matéria orgânica nos tratamentos do Tecnosolo estava com teores em concentrações médias (Sobral *et al.*, 2015). De fato, em áreas de florestas há o incremento de matéria orgânica pela deposição de serapilheira e pelo sistema radicular, mas o aumento em seu teor ainda não é visível. Assim a diferença entre florestas e Tecnosolo e a não diferença entre os tratamentos podem ser explicados porque: (I) o solo usado na construção do Tecnosolo perdeu sua estrutura original, em solos cujos agregados são afetados, o teor de matéria orgânica tende a ser menor, pois a quebra desses agregados (proteção física) libera formas menos estabilizadas de matéria orgânica ao solo (Bonifacio *et al.*, 2024; Sae-Tun *et al.*, 2022; Six; Paustian, 2014); e (II) o plantio é recente (3 anos), em solos arenosos, as alterações no teor de matéria orgânica é pouco perceptível em período curto de tempo (Sparling, 1992). Esses resultados corroboram com pesquisas realizadas com Tecnosolo em cronosequência, onde os resultados para carbono orgânico só foram significativos nos plantios com mais de sete anos (Ahirwal *et al.*, 2018). A capacidade de troca de cátions foi classificada como baixa no Tecnosolo (Sobral *et al.*, 2015), esse resultado pode ser atribuído ao

solo com menor teor em argila e matéria orgânica em comparação com a área de referência. Isso decorre do fato de que a argila e a matéria orgânica compõem a fração coloidal do solo, logo, influenciando diretamente na capacidade de troca de cátions, visto que essa variável expressa a capacidade de adsorção e armazenamento de nutrientes na superfície das partículas do solo (Moral; Rebollo, 2017). Assim, a matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica foram pouco alteradas no Tecnosolo com os tratamentos utilizados no terceiro ano.

5.4.3 Análise multivariada da qualidade química e física de um Tecnosolo sob diferentes técnicas de recuperação de área degradada

A análise multivariada permite compreender as relações complexas entre as variáveis estudadas (Mota *et al.*, 2014). Por exemplo, a correlação entre os fatores pH, cálcio, magnésio, alumínio e acidez potencial mostram as alterações provocadas pela aplicação de calcário no solo e sua atividade na profundidade de 0 a 10 e 10 a 20 cm, efeito esperado pela ação do calcário nas profundidades superficiais do solo (Aide, 2022; Junior *et al.*, 2020). As alterações nessas variáveis provocadas pela calagem atribuíram ao Tecnosolo características divergentes as do solo da floresta nativa, o que explica a maior contribuição no tratamento das variáveis: pH, saturação por bases, cálcio, soma de bases, magnésio. Isso acarretou maior distância entre o tratamento PFC e a floresta nativa. Ademais, foi observado no estudo que a matéria orgânica é a principal fonte de potássio e fósforo na área de estudo. A matéria orgânica é apontada como uma importante fonte desses nutrientes no solo e de superfície de absorção de cátions e ânions no solo (Castán *et al.*, 2016; Kang *et al.*, 2011; Laurent *et al.*, 2020; LU *et al.*, 2022; Ukwattage *et al.*, 2020). Essa relação fica evidente com a maior contribuição dessas variáveis devido a estarem relacionadas à área de floresta (área com maior teor de matéria orgânica), além da variável capacidade de troca de cátions, que está relacionada à capacidade de reter esses nutrientes e água no solo (Moral; Rebollo, 2017).

O índice de qualidade do solo vem sendo amplamente utilizado como parâmetro para definir a qualidade do solo em áreas de mineração, agricultura e floresta (Ahirwal *et al.*, 2018; Andrews; Karlen; Mitchell, 2002; Ruiz *et al.*, 2023b). A calagem surtiu efeito positivo quanto ao índice de qualidade do Tecnosolo na camada de 0 a 10 cm em comparação ao PF sem calagem. Entretanto, o índice apontou que a área de referência é superior em termos de qualidade do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Esse resultado pode ser atribuído ao curto tempo de recuperação do Tecnosolo. Em um estudo de cronosequência em Tecnosolo houve um crescimento substancial no índice de qualidade do solo com a idade da área de reflorestamento (Ahirwal *et al.*, 2018). Desse

modo, sugere-se que o incremento no manejo do Tecnosolo por meio da calagem favorece a recuperação da qualidade do solo, contudo, nesse período de avaliação (3 anos), não foi suficiente para alcançar valores equivalentes aos do solo da floresta.

5.5 Conclusão

No tratamento plantio adensado foi o mais favoreceu a qualidade física do Tecnosolo. Já a qualidade química foi fortemente influenciada pela incorporação de calcário no Tecnosolo, onde essa prática foi eficiente em diminuir a acidez do solo, contaminação por alumínio e aumentar os teores de nutrientes. Com isso, o plantio florestal com calagem foi o que obteve os melhores resultados de qualidade química para o período estudado. Entretanto, ao terceiro ano de recuperação da área, nenhuma das técnicas se aproximou do solo da floresta natural de referência em relação aos indicadores de qualidade estudados.

REFERÊNCIAS

AHIRWAL, Jitendra *et al.* Reclamation of coal mine spoil and its effect on Tecnosolo quality and carbon sequestration: a case study from India. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 28, p. 27992–28003, 2018.

AHIRWAL, Jitendra; MAITI, Subodh Kumar. Development of Tecnosolo properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India. **Catena**, v. 166, p. 114–123, 2018.

AIDE, Michael. Aluminum Soil Chemistry: Influence on Soil Health and Forest Ecosystem Productivity. **Agricultural Sciences**, v. 13, p. 917–935, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/as.2022.138057>. Acesso em: 13 maio 2024.

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

ANA. **Hidroweb**. 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 3 mar. 2024.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 90, n. 1, p. 25–45, 2002. Disponível em: Acesso em: 29 abr. 2024.

ARSHAD, M A; LOWERY, Birl; GROSSMAN, Bob. Physical Tests for Monitoring Soil Quality. *In*: DORAN, John W; JONES, Alice J (org.). **Methods for Assessing Soil Quality**. [S. l.]: Soil Science Society of America, 1997. v. 49.

BETANCUR-CORREDOR, Bibiana *et al.* Small-scale spatial variability of TecnoSolo properties in a chronosequence of reclamation of dredged-sediment landfills. **Land Degradation and Development**, v. 34, n. 12, p. 3712–3727, 2023.

BONIFACIO, Eleonora *et al.* Soil and management effects on aggregation and organic matter dynamics in vineyards. **Soil and Tillage Research**, v. 240, 2024.

BORTOLANZA, Delcio Rudinei; KLEIN, Vilson Antonio. Soil chemical and physical properties on an inceptisol after liming (Surface and incorporated) associated with gypsum application. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, 2016.

BRADSHAW, Anthony. **Restoration of mined lands-using natural processesEcological Engineering**. [S. l.: s. n.], 1997.

BRASIL, Edilson Carvalho; CRAVO, Manoel da Silva; VIÉGAS, Ismael de Jesus Matos. **Recomendações de Calagem e Adubação para o Estado do Pará**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2020. Disponível em: www.embrapa.br. Acesso em: 14 maio 2024.

BUDIYANTO, G. The effect of combination of sugarcane pressmud compost and potassium fertilizer on vegetative growth of corn in coastal sandy soil. **Food Research**, v. 5, n. 3, p. 289–296, 2021.

BÜNEMANN, Else K. *et al.* Soil quality—A critical review. **Soil biology and biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018

CASTÁN, Elisa *et al.* Managing the value of composts as organic amendments and fertilizers in sandy soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 224, p. 29–38, 2016.

ČÍŽKOVÁ, Barbara *et al.* Development of soil chemical and microbial properties in reclaimed and unreclaimed grasslands in heaps after opencast lignite mining. **Ecological Engineering**, v. 123, p. 103–11, 2018.

DE BANG, Thomas Christian *et al.* **The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants.** [S. l.]: Blackwell Publishing Ltd, 2021.

DE OLIVEIRA, Victor Pereira *et al.* Are liming and pit size determining for tree species establishment in degraded areas by kaolin mining?. **Ecological Engineering**, v. 178, n. 106599, p. 1–10, 2022.

DOMINATI, Estelle; PATTERSON, Murray; MACKAY, Alec. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858–1868, 2010.

DOS SANTOS, Danilo Rheinheimer *et al.* Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 222–231, 2018.

FENG, Yu *et al.* Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 191, p. 12-25, 2019.

FERNÁNDEZ, J. L. F. *et al.* Initial recovery of soil structure of a compacted forest soil can be enhanced by technical treatments and planting. **Forest Ecology and Management**, v. 431, p. 54–62, 2019.

FROUZ, Jan. Soil recovery and reclamation of mined lands. *In: SOILS AND LANDSCAPE RESTORATION*. 1. ed. Academic Press: Elsevier, 2020. p. 161–191.

GEE, G W; BAUDER, J W. Particle-size Analysis. *In: KLUTE, Arnold (org.). Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2. ed. New York: American Society of Agronomy, 1986. p. 383–411.

GONÇALVES, Saulo B. *et al.* Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. **Nativa**, v. 5, n. 3, 2017.

GUPTA, Sanatan Das; KIRBY, William; PINNO, Bradley D. Effects of Stockpiling and Organic Matter Addition on Nutrient Bioavailability in Reclamation Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. S1, 2019.

HUANG, Jingyi; HARTEMINK, Alfred E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, v. 208, 2020.

IBGE. **Geociência**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.

IBRAM. **Mineração em Números**. 2024. Disponível em: <https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/>. Acesso em: 30 maio 2024.

IMBANÁ, Rugana *et al.* Assessing the quality of constructed Tecnosolos enabled holistic monitoring of ecological restoration. **Journal of Environmental Management**, v. 353, 2024.

JUNIOR, Elio Conradi *et al.* Effects of Liming on Soil Physical Attributes: A Review. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 10, p. 278–286, 2020.

KANG, Jihoon *et al.* Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources. **Geoderma**, v. 161, n. 3–4, p. 194–201, 2011.

KARACA, Siyami *et al.* An assessment of pasture soils quality based on multi-indicator weighting approaches in semi-arid ecosystem. **Ecological Indicators**, v. 121, 2021.

KARLEN, D L *et al.* Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4–10, 1997.

KAZA, Silpa *et al.* **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. World Bank Publications, 2018.

KOPITTKKE, Peter M. *et al.* Kinetics and nature of aluminium rhizotoxic effects: A review. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 15, p. 4451–4467, 2016.

KOPITTKKE, Peter M.; BLAMEY, F. Pax C. Theoretical and experimental assessment of nutrient solution composition in short-term studies of aluminium rhizotoxicity. **Plant and Soil**, v. 406, n. 1–2, p. 311–326, 2016.

LAURENT, Céline *et al.* Increased soil pH and dissolved organic matter after a decade of organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability despite contamination. **Science of the Total Environment**, v. 709, p. 135927, 2020.

LEVI, Nathan *et al.* Soil quality index for assessing phosphate mining restoration in a hyper-arid environment. **Ecological Indicators**, v. 125, p. 107571, 2021.

LI, Fangfang *et al.* Soil quality assessment of reclaimed land in the urban–rural fringe. **Catena**, v. 220, p. 106692, 2023.

LIEBIG, Mark A; VARVEL, Gary; DORAN, John. A Simple Performance-Based Index for Assessing Multiple Agroecosystem Functions. **AGRONOMY JOURNAL**, v. 93, p. 313–318, 2001.

LIPIEC, Jerzy *et al.* Effects of application of recycled chicken manure and spent mushroom substrate on organic matter acidity and hydraulic properties of sandy soils. **Materials**, v. 14, n. 14, p. 4036, 2021.

LU, Dianjun *et al.* Comparison of potential potassium leaching associated with organic and inorganic potassium sources in different arable soils in China. **Pedosphere**, v. 32, n. 2, p. 330–338, 2022.

MAATHUIS, Frans JM. Physiological functions of mineral macronutrients. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 250–258, 2009.

MACDONALD, S. Ellen *et al.* Early trajectories of forest understory development on reclamation sites: Influence of forest floor placement and a cover crop. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 5, p. 698–706, 2015a.

MACDONALD, S. Ellen *et al.* Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. **New Forests**, v. 46, n. 5–6, p. 703–732, 2015b.

MARTINS, Walmer Bruno Rocha *et al.* Ecosystem restoration after bauxite mining: favorable indicators for Technosols construction and soil management using liming and subsoiling. **New Forests**, v. 52, n. 6, p. 971–994, 2021.

MIYAWAKI, Akira; GOLLEY, Frank B. Forest reconstruction as ecological engineering. **Ecological Engineering**, v. 2, p. 333–345, 1993.

- 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.
- MORAL, Francisco J; REBOLLO, Francisco J. Characterization of soil fertility using the Rasch model. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 2, p. 486–498, 2017.
- MOTA, Jaedson Cláudio Anunciato *et al.* Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau - CE, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 66–73, 2014.
- MUSTAPHA, S. *et al.* Potential of using kaolin as a natural adsorbent for the removal of pollutants from tannery wastewater. **Heliyon**, v. 5, n. 11, 2019.
- OLAYA-MONTES, Andres *et al.* Restoring soil carbon and chemical properties through silvopastoral adoption in the Colombian Amazon region. **Land Degradation and Development**, v. 32, n. 13, p. 3720–3730, 2021.
- ONÉSIMO, Cecilia M.G. *et al.* Ecological succession in areas degraded by bauxite mining indicates successful use of topsoil. **Restoration Ecology**, v. 29, n. 1, 2021.
- PRADO, Renato de Mello. **Nutrição de Plantas**. 1. ed. São Paulo: UNESP, 2008.
- QUINTAL, Emanuel Bojórquez *et al.* Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils. **Plant Science**, v. 8, p. 1–18, 2017.
- R CORE TEAM. **A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 30 jun. 2024.
- RAY, S K *et al.* Soil and land quality indicators of the Indo-Gangetic Plains of India. **CURRENT SCIENCE**, v. 107, n. 9, p. 1470-1486, 2014.
- REICHL, C; SCHATZ, M. **World Mining Data 2024**. Vienna:, 2024. v. 39
- RIBEIRO, Antonio Carlos; GUIMARÃES, Paulo Tácito G; VENEGAS, Victor Hugo Alvarez. **Recomendações Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 1999.

- ROCHA, Fernanda C.G. *et al.* Chemical and microstructural behaviour of ferruginous rocky outcrops topsoils applied to degraded mining areas. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 35, n. 3, p. 219–234, 2021.
- RUIZ, Francisco *et al.* Constructing soils for climate-smart mining. **Communications Earth and Environment**, v. 4, n. 1, p. 219, 2023a.
- RUIZ, Francisco *et al.* Fast pedogenesis of tropical Technosol developed from dolomitic limestone mine spoils (SE-Brazil). **Geoderma**, v. 374, p. 114439, 2020a.
- RUIZ, Francisco *et al.* Revealing Tropical Technosol as an Alternative for Mine Reclamation and Waste Management. **Minerals**, v. 10, n. 2, p. 110, 2020b.
- RUIZ, Francisco *et al.* Soil organic matter stabilization during early stages of Technosol development from Ca, Mg and pyrite-rich parent material. **Catena**, v. 232, p. 107435, 2023b.
- RUIZ, Francisco; CHERUBIN, Maurício Roberto; FERREIRA, Tiago Osório. Soil quality assessment of constructed Technosol: Towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. **Journal of Environmental Management**, v. 276, p. 111344, 2020.
- SAE-TUN, Orracha *et al.* Fungal biomass and microbial necromass facilitate soil carbon sequestration and aggregate stability under different soil tillage intensities. **Applied Soil Ecology**, v. 179, p. 104599, 2022.
- SHAH, Adnan Noor *et al.* Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10056–10067, 2017.
- SIX, Johan; PAUSTIAN, Keith. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. A4, 2014.
- SOBRAL, Lafayette Franco *et al.* **Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiro Costeiro, 2015. Disponível em: www.embrapa.com.br.
- SOLÉ, Pau *et al.* Physical and Chemical Properties of Limestone Quarry Technosol Used in the Restoration of Mediterranean Habitats. **Land**, v. 12, n. 9, p. 1730, 2023.

SPARLING, Graham P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**, v. 30, n. 2, p. 195–207, 1992.

SUUSTER, Elsa *et al.* Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. **Geoderma**, v. 163, p. 74–82, 2011.

TAYLOR, Howard M; ROBERSON, Gene M; PARKER, Jessie J. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18–22, 1966.

TEIXEIRA, Paulo César *et al.* (org.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br>.

THOMPSON, Fabiano *et al.* Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, v. 705, 2020.

UKWATTAGE, Nadeesha L. *et al.* Effect of Biochar and Coal Fly Ash Soil Amendments on the Leaching Loss of Phosphorus in Subtropical Sandy Ultisols. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 231, n. 2, p.56 2020.

UN. **THE 17 GOALS**. 2024. Disponível em: <https://DSgs.un.org/goals>. Acesso em: 27 jun. 2024.

UDSA. Chapter 3.—Examination and Description of Soil Profiles. *In*: SOIL SURVEY MANUAL. Agriculture Handbooked. v. 18, p. 83–234, 2017.

VASU, Duraisamy *et al.* Soil quality index (IQS) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. **Geoderma**, v. 282, p. 70–79, 2016.

WALKLEY, A; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

WASWA, Boaz S. *et al.* Evaluating indicators of land degradation in smallholder farming systems of western Kenya. **Geoderma**, v. 195–196, p. 192–200, 2013.

YU, S. *et al.* Surface runoff phosphorus (P) loss in relation to phosphatase activity and soil P fractions in Florida sandy soils under citrus production. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 3, p. 619-628, 2006.

6 SEGUNDO CAPÍTULO

CARBONO E INDICADORES MICROBIOLÓGICOS EM TECNOSSOLO PÓS-MINERAÇÃO DE CAULIM SOB DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

A construção de Tecnossolo é uma prática que contribui para a recuperação de áreas pós mineração. Entretanto, o material utilizado geralmente é originado de solos perturbados e desestruturados, onde o *topsoil* foi diluído em camadas mais profundas do solo. Assim, é necessário adotar práticas que visam a melhoria da qualidade do Tecnossolo. Com isso, o objetivo do estudo foi avaliar se diferentes métodos de recuperação de áreas degradadas afetam o carbono e os indicadores microbiológicos de um Tecnossolo oriundo da mineração de caulim. O experimento foi desenvolvido na mina IRCC em Ipixuna do Pará, PA, Brasil. O Tecnossolo foi constituído de rejeito da mineração de caulim e uma camada de 0,6 m de solo. Os tratamentos foram: NU - nucleação; PA - plantio de 3 mudas m⁻²; PF - plantio no espaçamento 3 x 3 m; e PFC - plantio no espaçamento 3 x 3 m, com a aplicação de 2 t ha⁻² de calcário dolomítico e FN - floresta nativa. A coleta foi realizada em junho de 2023 em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm). Foram analisados o carbono oxidável (CPOx), carbono orgânico (CO), carbono da Biomassa Microbiana (CBM), Respiração Basal (RBS) e foram estimados o estoque de carbono orgânico (E-CO), quociente microbiano (qMIC) e o quociente metabólico (qCO₂). Na profundidade de 0-10 cm não houve diferença entre os tratamentos no Tecnossolo para o CO, enquanto para as variáveis E-CO, CPOx, CBM, RB, qMIC e qCO₂ apresentou efeito significativo para seguindo os padrões NU>PA=PF=PFC, NU=PA>PF=PFC, NU>PA=PFC>PF, NU>PF>PA>PFC, NU=PFC>PA=PF e PF>NU=PA>PFC. Ao comparar com FN na profundidade, FN foi maior que os tratamentos para CO, E-CO, CPOx e CBM. Enquanto as variáveis RB e qMIC, FN foram significativamente menores que NU e PFC, em qCO₂ FN também foi menor que os tratamentos, exceto PFC, indicando uma menor perda de carbono. Na profundidade de 10-20 cm, CO não foi significativo entre os tratamentos, enquanto as variáveis E-CO, CPOx, CBM, RB, qMIC e qCO₂ seguiram os padrões NU=PF=PFC>PA, PFC>NU=PA=PF, PA>NU>PFC=PF, PA>NU=PF=PFC e NU=PA=PF>PFC, respectivamente. Os tratamentos foram significativamente menores que FN em CO, E-CO, CPOx. Para CBM, FN foi maior que os tratamentos, exceto para PA, que não houve diferença significativa. Para RB, qMIC e qCO₂, a FN foi significativamente menor que PA e NU, PA e NU, PA e PF, respectivamente. Com isso, a qualidade do Tecnossolo para as variáveis estudadas ainda não se iguala à da floresta nativa. Entretanto, a nucleação se destaca aos demais tratamentos no Tecnossolo.

Palavras-chave: Estoque de carbono orgânico, Recuperação de área degradada, nucleação, calagem, método Miyawaki

6 SECOND CHAPTER

CARBON AND MICROBIOLOGICAL INDICATORS IN A TECHNOSOL AFTER KAOLIN MINING UNDER DIFFERENT METHODS OF RECLAMATION OF DEGRADED AREAS IN EASTERN AMAZON

ABSTRACT

Technosol construction is a practice that contributes to the recovery of post-mining areas. However, the material generally comes from disturbed and unstructured soils, where the topsoil was diluted into deeper soil layers. It is therefore necessary to adopt practices aimed to improving the Technosol quality. This study aimed to assess whether different techniques for recovering degraded areas affect the carbon and microbiological indicators of a Technosol from kaolin mining. The experiment was set up at the IRCC mine in Ipixuna do Pará, PA, Brazil, in 2020. The Technosol was made up of tailings from kaolin mining and a 0.6-meter layer of soil. The treatments were: NU - nucleation; PA - planting 3 seedlings m⁻²; PF - planting at 3 x 3 m spacing; and PFC - planting at 3 x 3 m spacing, with the application of 2 t ha⁻² of dolomitic limestone and FN - native forest. The soil was collected in June 2023 at two depths (0-10 and 10-20 cm). Oxidizable carbon (CPOx), organic carbon (CO), Microbial Biomass Carbon (CBM), and basal respiration (RBS) were analyzed and the organic carbon stock (E-CO), microbial quotient (qMIC) and metabolic quotient (qCO₂) were estimated. In depth 0-10 cm in the Technosol, CO was not significant, while the variables E-CO, CPOx, CBM, RB, qMIC and qCO₂ were significant following the respective patterns: NU>PA=PF=PFC, NU=PA>PF=PFC, NU>PA=PFC>PF, NU>PF>PA>PFC, NU=PFC>PA=PF and PF>NU=PA>PFC. When compared with FN at depth, FN was higher than the treatments for CO, E-CO, CPOx, and CBM. While in the variables RB and qMIC, FN was lower than NU and PFC, in qCO₂, FN was lower than the treatments, except for PFC. In depth of 10-20 cm, CO was not significant among the treatments, while the variables E-CO, CPOx, CBM, RB, qMIC, and qCO₂ followed the patterns NU=PF=PFC>PA, PFC>NU=PA=PF, PA>NU>PFC=PF, PA>NU=PF=PFC and NU=PA=PF>PFC, respectively. The treatments were lower than FN in CO, E-CO, and CPOx. For CBM, FN was higher than the treatments, except for PA, where there was no difference. For RB, qMIC, and qCO₂, the FN was lower than PA and NU, PA and NU, and PA and PF, respectively. As a result, the Technosol quality for the variables studied is not yet equal to that of the native forest. Nucleation, however, stands out from the other treatments in Technosol.

Keywords: Organic carbon stock, Recovery of degraded areas, nucleation, liming, Miyawaki method

6.1 Introdução

Na 21ª Conferência das Partes (COP21) de Paris em 2015, promovido pela convenção do quadro climático das nações unidas sobre mudanças climáticas, foi estabelecido a meta de reduzir as mudanças climáticas, limitando o aquecimento global para menos de 2 °C ao comparar com a temperatura pré-industrial (UNFCCC, 2015). Para isso, é necessário reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE) (Ntinyari; Gweyi-Onyango, 2021). Nesse contexto, o gerenciamento dos ecossistemas de maneira sustentável é um componente chave para cumprir essa meta (Don *et al.*, 2024), devido ao elevado potencial que áreas florestais e terras agrícolas tem de sequestrar CO₂ da atmosfera, ajudando a mitigar as mudanças climáticas (Griscom *et al.*, 2017). Assim, surgiram iniciativas como o carbono 4 por 1000, que foi proposto durante a COP21 e tem o objetivo de aumentar o conteúdo de matéria orgânica do solo em 0,4% ao ano no mundo para compensar as emissões GEE pela atividade antrópica (Minasny *et al.*, 2017).

O sequestro de carbono é o processo de captura e armazenamento do CO₂ em reservatório diferente do atmosférico, reduzindo a concentração líquida do gás na atmosfera (Lal, 2008; Lal; Negassa; Lorenz, 2015). No solo, o sequestro ocorre com a transformação de CO₂ da atmosfera em carbono do solo por meio de plantas, resíduos vegetais e outros sólidos orgânicos, que serão armazenados como parte da matéria orgânica do solo por curto ou longo prazo (Olson, 2010). A capacidade de armazenamento de carbono orgânico do solo é de duas a três vezes maior que na atmosfera, o fazendo como um possível mitigador das mudanças climáticas (Minasny *et al.*, 2017). Entretanto, é importante destacar a diferença entre o armazenamento de carbono no solo e o sequestro de carbono, pois a definição de armazenamento é mais amplo, por não envolver necessariamente a remoção de carbono da atmosfera, apesar de favorecer em termos de mitigação de GEE, devido ao aumento do estoque de carbono no solo (Chenu *et al.*, 2019). O conteúdo de carbono no solo é afetado pelo manejo, práticas que adicionam matéria orgânica afetam positivamente o estoque de carbono (Ma *et al.*, 2024; Moreno-Barriga *et al.*, 2017; Nazir *et al.*, 2024), enquanto as que afetam a estrutura do solo contribuem negativamente por facilitarem a oxidação da matéria orgânica (Bonifacio *et al.*, 2024; Hok *et al.*, 2015; Six; Paustian, 2014).

Nesse sentido, pelo fato de a mineração causar grave perturbação ao solo (Feng *et al.*, 2019; Frouz, 2020; Gupta; Kirby; Pinno, 2019; Macdonald *et al.*, 2015) e o Tecnosolo ser construído com material que foi exposto aos intemperes ambientais que, de outra forma, não seria exposto (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014), espera-se que haja um

menor estoque de carbono no Tecnosolo. Entretanto, a recuperação da qualidade do Tecnosolo pode aumentar o teor de carbono no solo, pois o conteúdo de carbono orgânico do solo é variável e depende da entrada e saída de carbono (Don *et al.*, 2024). Nesse sentido, os microrganismos afetam o conteúdo de carbono no solo por meio da decomposição de material orgânico, que será rapidamente mineralizada se não for adequadamente estabilizada (Don *et al.*, 2024; Moreno-Barriga *et al.*, 2017), assim podendo ser liberada o carbono na forma de CO₂. Conseqüentemente, a respiração basal do solo é uma variável importante para analisar a emissão de carbono pelo solo (Ma *et al.*, 2024). Com isso, as mudanças no estoque de carbono orgânico do solo são consequência de dois fluxos principais: (I) fração da produção primária líquida que entra no solo (Ex. serapilheira); e (II) o efluxo da respiração que libera o carbono do solo (Bondeau *et al.*, 2007).

O Tecnosolo pode contribuir para aliviar as emissões de CO₂ com uso de métodos de manejo e culturas adequadas (Rees *et al.*, 2019). Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar se diferentes métodos de recuperação de áreas degradadas afetam o carbono e os indicadores microbiológicos de um Tecnosolo oriundo da mineração de caulim. A hipótese levantada é que a nucleação por meio da adição resíduos orgânicos de supressão vegetal eleva o conteúdo de carbono no solo e, conseqüentemente, melhora a qualidade microbiológica do Tecnosolo.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido na mina Imerys Rio Capim Caulim (IRCC) em uma área de lavra. A mina está localizada na margem esquerda da bacia do Rio Capim no município de Ipixuna do Pará, Pará, Brasil (Figura 2, A). A vegetação natural da área é classificada como Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas e a classe do solo é Latossolo Amarelo (IBGE, 2024). O clima da região é do tipo Aw conforme classificação de Köppen e Geiger, sua estação seca é bem definida, com temperatura média anual de 25,3 °C e umidade relativa acima de 80% (Alvares *et al.*, 2013). A precipitação acumulada média dos últimos 10 anos foi de 2.602 mm, com o período de maior precipitação pluviométrica entre os meses de janeiro e maio, com pico em março (437 mm), e de menor precipitação entre agosto e setembro, com menor valor em agosto (20 mm). A coleta foi realizada em julho de 2023 e a precipitação pluviométrica foi de 57 mm (Figura 2, B) (ANA, 2024).

6.2.2 Delineamento experimental

O Tecnosolo foi construído com camada de rejeito oriundo do beneficiamento do caulim (areia) e uma camada de 0,60 m com topsoil misturado com estéril. Na área, foi realizada a subsolagem e o plantio de capim do gênero *Brachiaria* sp. antes da implantação do experimento. A área experimental possuía aproximadamente 1,25 hectare dividida em quatro métodos de recuperação de área degradada (Tabela 1). A nucleação (NU) possuía núcleos formados a partir de resto de galhada gerada pela supressão vegetal. No tratamento, também foi realizado o enriquecimento dos núcleos com espécies florestais. A técnica de plantio adensado (PA) foi pelo método Miyawaki (Miyawaki; Golley, 1993). Nesse tratamento, não houve o nivelamento do terreno com o intuito de diminuir a entrada de maquinário. Nos tratamentos de plantio florestal (PF) e plantio florestal com calagem (PFC), foi realizado o replantio após dois meses com adubação de base com NK (18-18) + 0,5% boro, 0,5% cobre e 0,5% zinco com aplicação em círculo ou meia lua a uma distância de 20 cm. Foi realizada calagem com calcário dolomítico (Poder Relativo de Neutralização Total - PRNT 83%, CaO 33% e MgO 12%) no tratamento PFC com incorporação e NU e PA por superfície (Tabela 1). As espécies usadas nos tratamentos estão listadas na tabela 2 e as características químicas e físicas estão na tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização química e física do experimento na mina IRCC, Ipixuna do Pará, PA, Brasil.

	DS	RP	Argila	Silte	Areia	pH	P	K	Ca	Mg	Al	AP
	g cm ⁻¹	MPa	----- g kg ⁻¹ -----			CaCl ₂	----- mg dm ⁻³ -----		-----cmol _c dm ⁻³ -----			
0 - 10 cm												
FN	1,14 ± 0,07	0,60 ± 0,06	373,44 ± 23,69	96,24 ± 4,51	530,33 ± 26,99	3,53 ± 0,15	0,16 ± 0,01	23,50 ± 6,49	0,60 ± 0,20	0,36 ± 0,14	1,93 ± 0,31	11,30 ± 1,87
NU	1,57 ± 0,16	0,92 ± 0,07	331,69 ± 15,73	37,01 ± 4,93	631,30 ± 10,94	4,31 ± 0,25	0,57 ± 0,09	11,70 ± 1,69	0,67 ± 0,08	0,36 ± 0,20	0,46 ± 0,30	4,02 ± 1,32
PA	1,43 ± 0,17	0,76 ± 0,19	224,61 ± 74,09	35,40 ± 6,66	739,99 ± 69,54	3,92 ± 0,09	0,19 ± 0,08	14,02 ± 3,66	0,33 ± 0,12	0,13 ± 0,12	0,99 ± 0,03	4,66 ± 0,75
PF	1,50 ± 0,14	1,98 ± 0,40	218,68 ± 26,91	71,15 ± 5,62	710,18 ± 25,86	3,97 ± 0,13	0,11 ± 0,02	10,74 ± 2,88	0,50 ± 0,25	0,10 ± 0,08	1,06 ± 0,26	4,13 ± 0,33
PFC	1,48 ± 0,14	1,01 ± 0,14	250,71 ± 8,67	73,04 ± 7,61	676,25 ± 7,43	5,26 ± 0,34	0,09 ± 0,02	8,58 ± 1,15	1,31 ± 0,31	0,74 ± 0,27	0,05 ± 0,02	1,87 ± 0,79
10 - 20 cm												
FN	1,37 ± 0,06	1,22 ± 0,20	394,91 ± 21,08	94,44 ± 6,53	510,65 ± 24,77	3,57 ± 0,07	0,13 ± 0,01	14,53 ± 1,34	0,36 ± 0,12	0,16 ± 0,04	1,64 ± 0,38	8,21 ± 0,62
NU	1,72 ± 0,18	4,04 ± 0,51	304,01 ± 11,51	68,16 ± 3,23	627,83 ± 9,34	4,20 ± 0,08	0,08 ± 0,03	12,55 ± 3,28	0,76 ± 0,13	0,13 ± 0,05	0,80 ± 0,22	3,06 ± 0,70
PA	1,55 ± 0,28	1,59 ± 0,15	213,67 ± 71,10	44,40 ± 7,88	741,93 ± 67,66	3,94 ± 0,02	0,10 ± 0,02	14,24 ± 7,41	0,26 ± 0,14	0,10 ± 0,00	0,95 ± 0,10	4,45 ± 0,56
PF	1,46 ± 0,08	4,36 ± 0,78	260,44 ± 20,91	58,88 ± 3,58	680,68 ± 23,57	3,92 ± 0,16	0,08 ± 0,00	11,90 ± 4,93	0,38 ± 0,21	0,11 ± 0,08	1,17 ± 0,24	3,88 ± 0,14
PFC	1,50 ± 0,22	2,78 ± 0,36	261,79 ± 22,88	74,88 ± 10,88	663,32 ± 21,45	4,89 ± 0,59	0,09 ± 0,01	11,47 ± 5,55	1,00 ± 0,30	0,40 ± 0,14	0,17 ± 0,11	2,12 ± 0,97

A densidade do solo (DS) foi determinado pelo método do anel volumétrico, a resistência a penetração (RP) com penetrômetro Falker, PLG 1020, potencial hidrogeniônico (pH) na proporção 1:2,5 com pHmetro de bancada. O fósforo (P) e o potássio (K) foram extraídos pelo método de Mehlich 1 (H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹) e determinados por colorimetria em espectrofotômetro para P e MPA-S para K. O cálcio (Ca), magnésio (Mg) e o alumínio (Al) foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e a Acidez potencial (AP) com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, a determinação foi por volumetria de complexação com EDTA 0,0125 mol L⁻¹ para Ca e Mg e alcalimétrica com NaOH 0,025 mol L⁻¹ para Al e AP (Teixeira *et al*, 2017). A argila, silte e areia foram determinados pelo método da pipeta (Gee; Bauder, 1986).

6.2.3 Amostragem

Os tratamentos e a área de referência foram divididos em quatro parcelas (25 × 25 m) para a coleta. Em cada parcela, foi coletada uma amostra composta para cada profundidade (0-10 e 10-20 cm), as amostras eram constituídas de 10 amostras simples coletadas de modo aleatório dentro de cada parcela com auxílio de um trado holandês de 10 cm. As amostras foram armazenadas em sacos de polietileno e em isopor com gelo para estagnar a atividade microbiana.

6.2.4 Análises de laboratório

As análises de carbono orgânico do solo (CO) e o carbono oxidável (CPOx) foram determinadas com amostras deformadas, secas em estufa de circulação forçada e peneiradas com peneira de 2 mm. O carbono orgânico do solo foi avaliado por volumetria de oxidorredução. Nesse método, há a oxidação do C da matéria orgânica para CO₂ e a redução do Cr⁺⁶ para Cr⁺³ contido em 10 ml de dicromato de potássio 0,167 mol L⁻¹ (K₂Cr₂O₇). Foi usado a solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5 mol L⁻¹ (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂.6H₂O) como titulante para reduzir o Cr⁺⁶ que não reagiu com o CO (Walkley; Black, 1934). O carbono oxidável do solo foi determinado pela reação com o permanganato de potássio 0,02 mol L⁻¹ (KMnO₄). A extração foi realizada utilizando 2,5 g de solo seco ao ar dispersa em 20 ml de KMnO₄, onde as amostras foram agitadas a 180 rpm por 120s, após agitação, ficaram decantando por 10 min. Posteriormente, foi retirada uma alíquota de 0,2 mL do sobrenadante e diluiu-se em 9,8 mL de água destilada. A leitura foi realizada com o sobrenadante diluído por colorimetria com o equipamento espectrofotômetro UV-M51 da BEL-Photonics no comprimento de onda de 550 μm. Na leitura, foi avaliado o declínio na concentração do permanganato com adição da amostra de solo, onde o Mn⁷⁺ foi reduzido para Mn⁴⁺. Foi usada a equação 6 para calcular a concentração de CPOx (Weil *et al.*, 2003).

$$CPOx(mgkg^{-1}) = [0,02(a + bz)] \times 9000 \times \left(\frac{0,02}{0,0025} \right)$$

(6)

Onde: O 0,02 é a concentração inicial do permanganato (mol L⁻¹), a e b são, respectivamente, o intercepto e a inclinação da curva padrão, z é a absorbância da amostra, 9000 é a quantidade de C oxidável em 1 mol de MnO₄ (mg cmol⁻¹), 0,02 é a alíquota usada do sobrenadante (L) e o 0,0025 é a quantidade de solo usado na análise (kg).

Para o cálculo de estoque de carbono orgânico do solo (E-COS), foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de um trado Uhlend em cilindros metálicos de volume conhecido. As amostras indeformadas foram pesadas e os cilindros medidos com paquímetro. Para obter a densidade do solo, foi utilizada o método do anel volumétrico, que consiste em medir a massa do solo contido em um cilindro metálico de volume conhecido, para posteriormente calcular conforme a equação 7, os resultados estão na tabela 5. Em seguida, foram utilizados os teores de CO para estimar os valores de E-COS conforme equação 8 (Veldkamp, 1994). Para compensar a massa de solo do Tecnosolo com maior densidade ao comparar com FN (tabela 1), foi utilizada a equação 9 que calcula o E-COS corrigindo pela compactação do solo em função da área de referência (Sisti *et al.*, 2004).

$$DS(g\text{ cm}^{-3}) = \frac{m_s(g)}{V_{anel}(\text{cm}^3)} \quad (7)$$

Onde m_s é massa do solo seco (g) e V_{anel} é o volume do cilindro metálico (cm^3).

$$E-CO(\text{Mg ha}^{-1}) = \frac{CO(g\text{ kg}^{-1}) \times DS(g\text{ cm}^{-3}) \times E(\text{cm})}{10} \quad (8)$$

CO é o carbono orgânico (g kg^{-1}), DS é a densidade do solo (g cm^{-3}) e E é a espessura da camada avaliada (cm).

$$E-COS_c = \sum_{i=1}^{n-1} C_{T_i} - \left[M_{T_i} - \left(\sum_{i=1}^n M_{T_i} - \sum_{i=1}^n M_{S_i} \right) \right] C_{T_n} \quad (9)$$

Onde $E-COS_c$ é o estoque de carbono orgânico do solo corrigido, $\sum_{i=1}^{n-1} C_{T_i}$ é a somatória dos estoques de C da primeira e penúltima profundidade amostrada do tratamento considerado para correção (Mg ha^{-1}), M_{T_i} massa do solo da última camada amostrada no tratamento (Mg ha^{-1}), $\sum_{i=1}^n M_{T_i}$

é a somatória da massa total do solo amostrado no tratamento (Mg ha^{-1}), $\sum_{i=1}^n M_s$, é a somatória total da massa do solo e C_{T_n} é o teor de C do solo na última camada amostrada (Mg C Mg^{-1} de solo).

Para o carbono da biomassa microbiana (CBM) e a respiração basal do solo (RB) foi utilizada amostras deformadas, que foram armazenadas em temperatura de ± 5 °C, essas amostras foram peneiradas em peneira de 2 mm e os resíduos vegetais e animais foram retirados com auxílio de pinça de aço inox. O carbono da biomassa microbiana foi obtido pelo método de irradiação-extração. Nesse método, a extração é realizada com 10 g de solo irradiado (IR) e não irradiado (NIR) disperso em 40 mL de solução de sulfato de potássio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. As amostras IR foram submetidas a 800 J g^{-1} de energia eletromagnética para lise das células microbianas em forno micro-ondas (modelo BMS45BBHNA). A oxidação foi com solução de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ $0,066 \text{ mol L}^{-1}$ em meio ácido com 10 mL de ácido sulfúrico e a determinação foi por titulação com sulfato ferroso amoniacal $0,03 \text{ mol L}^{-1}$ (Islam; Weil, 1998), o fator de conversão (K_c) utilizado para converter em carbono microbiano foi 0,33 (Sparling; West, 1988).

A respiração basal do solo foi determinada pela emissão de CO_2 por microrganismos após incubação de 30 g de solo com 10 mL de solução de NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em recipientes de plástico hermético. Após incubação de 10 dias em ambiente livre de luz, foi retirada uma alíquota de 4 mL do NaOH incubado, foi adicionado 4 mL de cloreto de bário $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (BaCl_2) e o indicador fenolftaleína. As amostras foram tituladas com ácido clorídrico $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (HCl) (Jenkinson; Powlson, 1976).

Os resultados de CO e CBM foram utilizados para calcular o quociente microbiano (qMIC) conforme o método de com a equação 10 (Sparling, 1992).

$$qMIC (\%) = \frac{CBM (g kg^{-1})}{CO (g kg^{-1})} \times 100 (10)$$

Onde qMIC é o quociente microbiano (%), o CBM é o carbono da biomassa microbiana do solo (g kg^{-1}) e o CO é o carbono orgânico do solo (g kg^{-1}).

E os de RBS e CBM foram usados para calcular o quociente metabólico, conforme enquadramento 11 (Anderson; Domsch, 1993).

$$qCO_2 \left(mg CO_2 - C g^{-1} CBM \right) = \frac{\left(\frac{RBS \left(ug \text{ de } C - CO_2 g^{-1} \right)}{t \left(h \right)} \right)}{CBM \left(mg kg^{-1} \right)} \cdot 1000 \quad (11)$$

Na equação, qCO_2 é o quociente metabólico ($mg CO_2 - C g^{-1} CBM$), RBS é a respiração basal do solo ($ug \text{ de } C - CO_2 g^{-1}$) após incubação, t tempo de incubação em horas e CBM é o carbono da biomassa microbiana ($mg kg^{-1}$).

6.3.4 Análise de dados

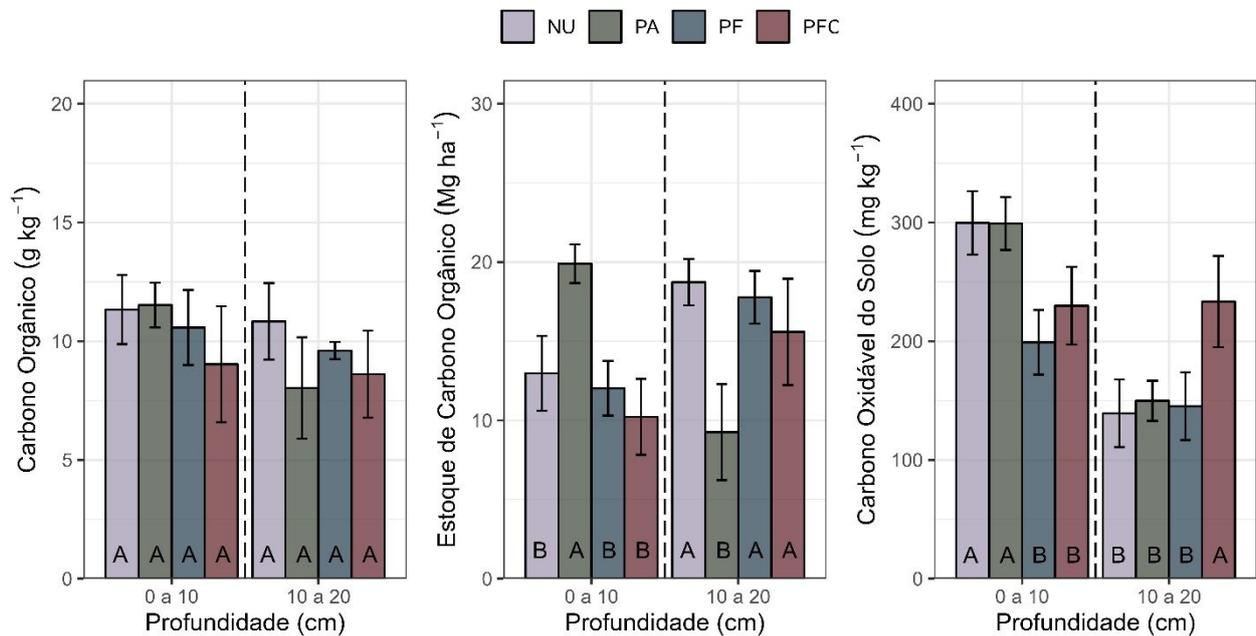
Os resultados foram analisados na linguagem R versão 4.3.1 (R Core Team, 2023). Foi realizado o teste Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade dos resíduos e o teste de Bartlett para avaliar a homoscedasticidade. Quando havia desconformidades com os pressupostos da análise de variância (não normal e heterocedástico), as variáveis eram transformadas por Box-Cox. Posteriormente, foi realizada a análise de variância e, quando a hipótese nula era rejeitada, foi realizado o teste de Tukey para comparar os tratamentos no Tecnosolo e o teste de Dunnett para comparar com a área de referência (FN). Além disso, foi realizada a análise de correlação de Spearman e a análise de componente principal.

6.3 Resultados

6.3.1 Comparação entre as técnicas de recuperação de área degradadas em Tecnosolo

A variável carbono orgânico não foi afetada pelos tratamentos ($p\text{-valor} > 0,05$), enquanto para o estoque de carbono orgânico e carbono oxidável do solo houve efeito dos tratamentos ($p\text{-valor} < 0,01$ e $p\text{-valor} < 0,01$, respectivamente). Em estoque de carbono, o padrão observado na profundidade de 0-10 cm foi $PA > NU = PF = PFC$ e na de 10-20 cm foi $PA < NU = PF = PFC$. Enquanto para carbono oxidável variou de acordo com $NU = PA > PFC = PF$ em 0-10 cm e em 10 – 20 foi $PFC > NU = PA = PF$ (Figura 11).

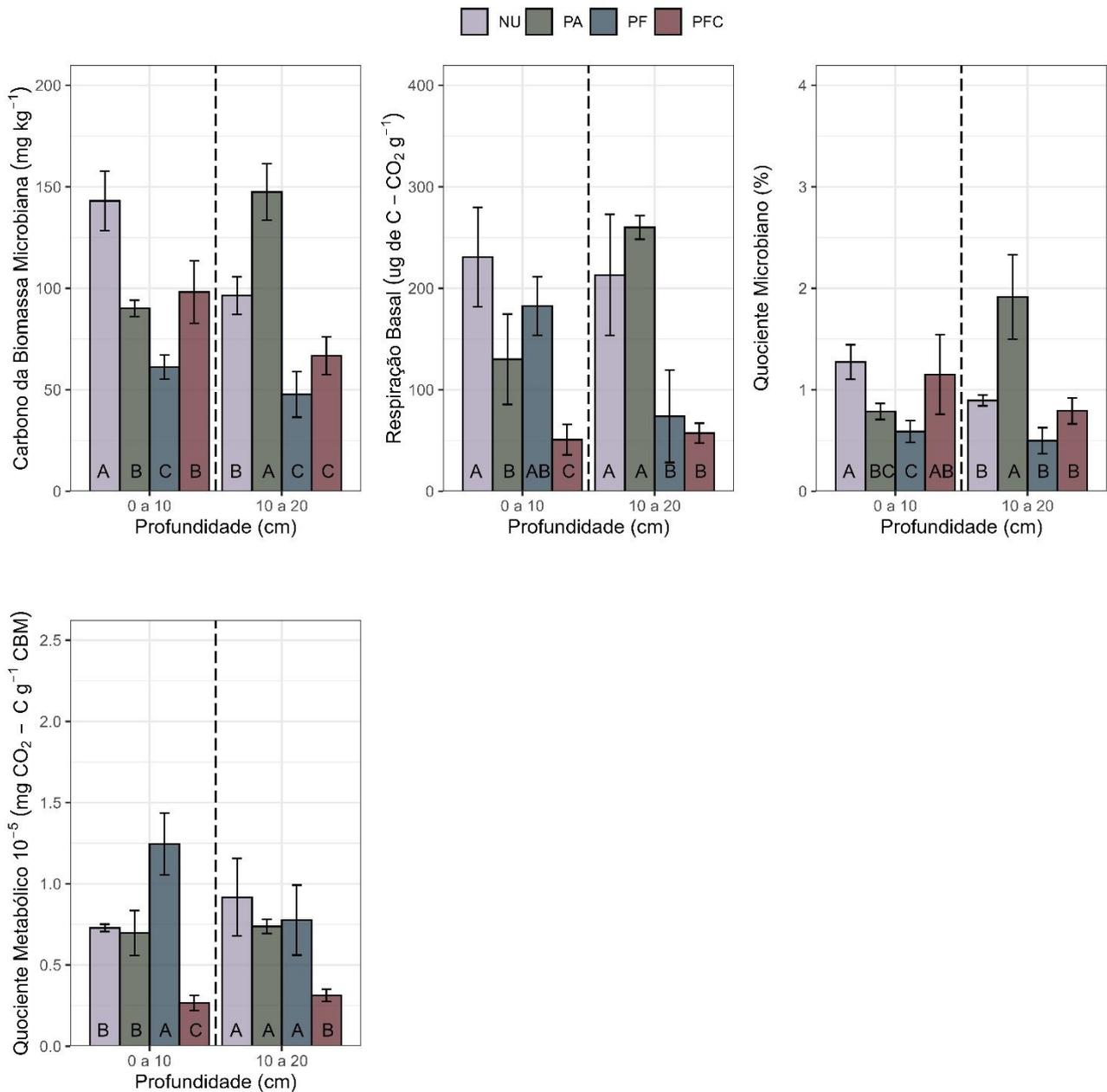
Figura 11 - Comparação dos indicadores: carbono orgânico, estoque de carbono e carbono oxidável, entre os tratamentos no Tecnosolo.



As barras seguidas de letras diferentes são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); as linhas verticais representam o erro padrão ($n=4$). NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

As variáveis microbianas foram alteradas com os tratamentos (p -valor $> 0,01$). Na profundidade de 0-10 cm, o carbono da biomassa microbiana variou seguindo $NU > PA = PFC > PF$, a respiração basal do solo foi $NU = PF > PA > PFC$, o quociente microbiano foi $NU = PFC > PA = PF$ e o quociente metabólico foi $PF > NU = PA > PFC$. Enquanto na profundidade de 10-20 cm, o carbono da biomassa microbiana foi $PA > NU > PFC = PF$, a respiração basal do solo foi $NU = PA > PF = PFC$, quociente microbiano foi $PA > NU = PF = PFC$ e para o quociente metabólico seguiu $NU = PA = PF > PFC$ (Figura 12).

Figura 12 - Comparação dos indicadores microbiológicos entre os tratamentos no Tecnosolo.



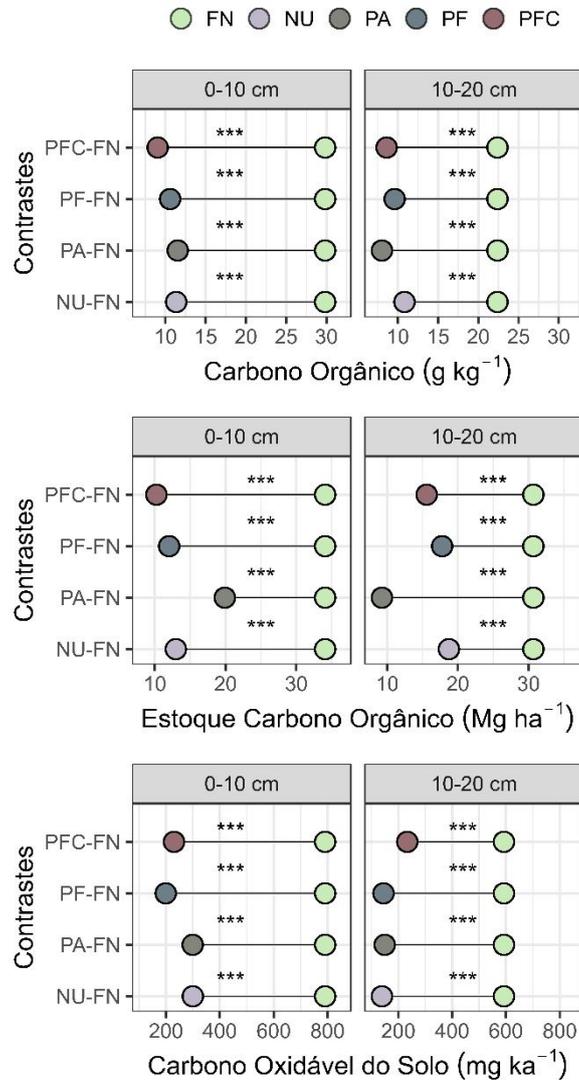
As barras seguidas de letras diferentes são significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); as linhas verticais representam o erro padrão ($n=4$). NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

6.3.2 Técnicas de recuperação do Tecnosolo x ecossistema de referência

Ao comparar o carbono orgânico do solo, estoque de carbono e o carbono oxidável do solo dos tratamentos com a área de referência, os contrastes PFC-FN, PF-FN, PA-FN e NU-FN foram

significativos (p -valor $< 0,01$), com o ecossistema de referência sendo maior que os tratamentos em ambas as profundidades (Figura 13).

Figura 13 - Comparação dos indicadores: carbono orgânico, estoque de carbono e carbono oxidável, entre os tratamentos no Tecnossolo com a área de referência.

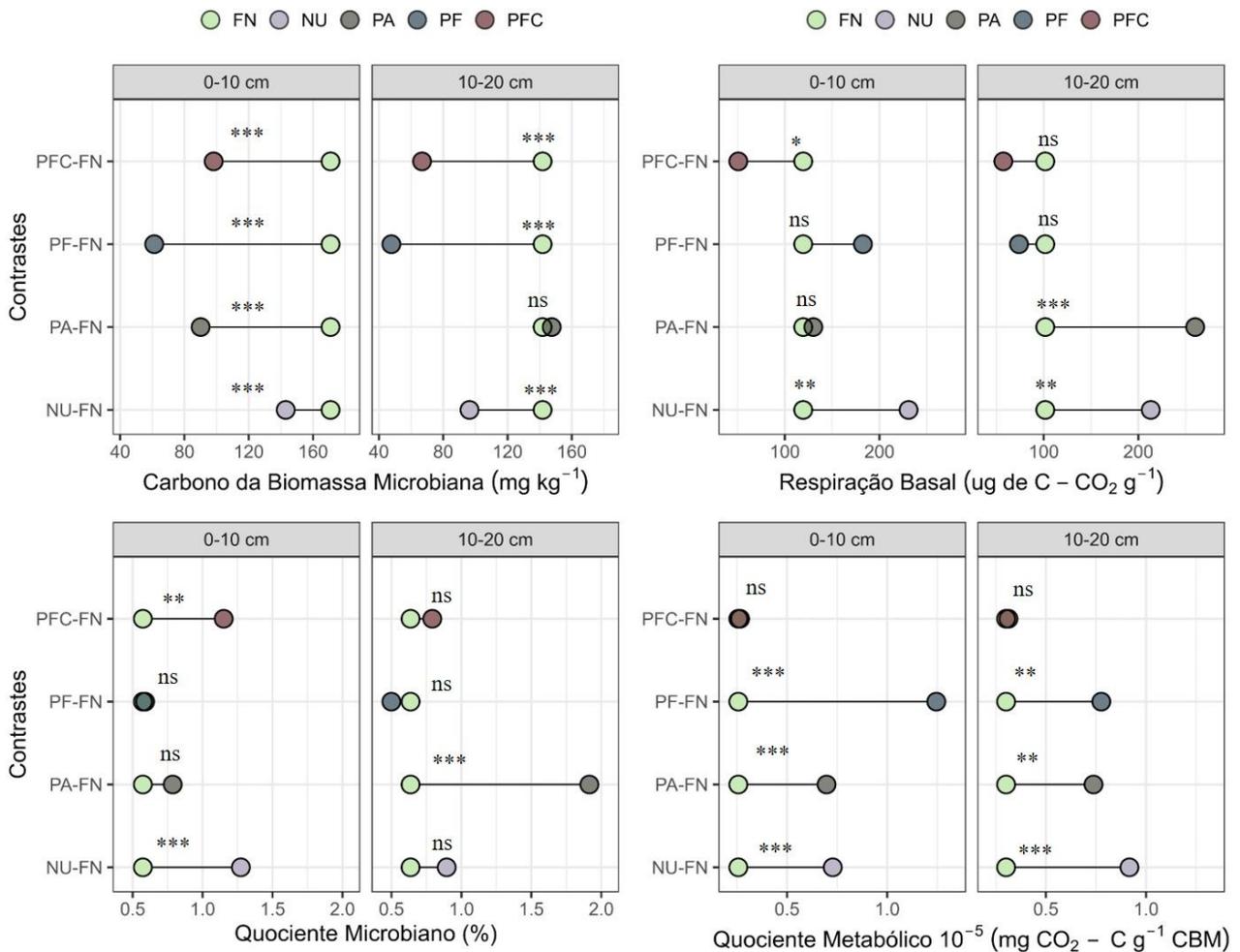


Os contrastes seguidos de *, **, *** são significativamente diferentes pelo teste de Dunnett com p -valor menor 0,05, 0,01, 0,001 e ns de não significativo. FN – Florestal Nativa, NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

Na profundidade de 0-10 cm, para o carbono da biomassa microbiana, todos os contrastes foram significativos, com os teores em FN maiores que nos tratamentos. Enquanto em respiração basal do solo, apenas PFC-FN, com FN > PFC, e NU-FN, com NU > FN, foram significativos (p -valor

< 0,01). O quociente microbiano foi significativo em PFC-FN e NU-FN, com PFC e NU maiores que FN, e o quociente microbiano dos contrastes PF-FN, PA-FN e NU-FN foram significativos, onde FN foi menor que os tratamentos em todos os contrastes. Ao avaliar a profundidade de 10-20 cm, os contrastes PFC-FN, PF-FN e NU-FN foram significativos, com FN maior que os tratamentos no Tecnosolo. Os contrastes PA-FN e NU-FN foram significativos para a respiração basal do solo, com PA e NU maiores que FN. Já para o quociente microbiano, apenas o contraste PA-FN apresentou diferença, com PA maior que FN. Os contrastes PF-FN, PA-FN e NU-FN foram significativos para o quociente metabólico, em todos, FN foi menor (Figura 14).

Figura 14- Comparação dos indicadores microbiológicos entre os tratamentos no Tecnosolo com a área de referência.

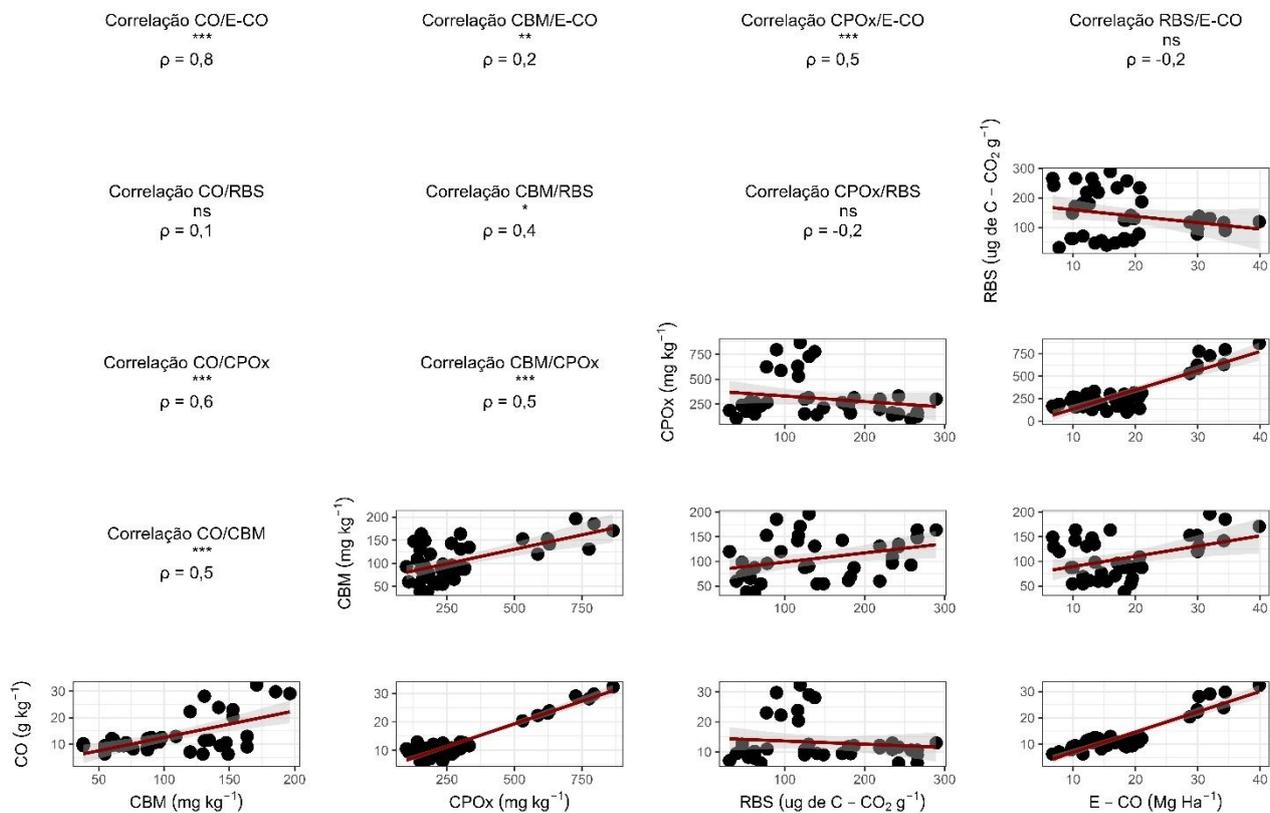


Os contrastes seguidos de *, **, *** são significativamente diferentes pelo teste de Dunnett com p-valor menor 0,05, 0,01, 0,001 e ns de não significativo. FN – Florestal Nativa, NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

6.3.3 Análise multivariada de diferentes indicadores de carbono

Das 10 diferentes correlações possíveis, 7 foram significativas (p -valor $< 0,05$). O CO se correlacionou com o CPOx, CBM e E-CO. Além do CO, o CBM se correlacionou com o CPOx, RBS e E-CO. Ademais, CPOx e E-CO também se correlacionaram. Todas as correlações foram positivas (Figura 15).

Figura 15 - Correlação de Spearman dos indicadores avaliados.

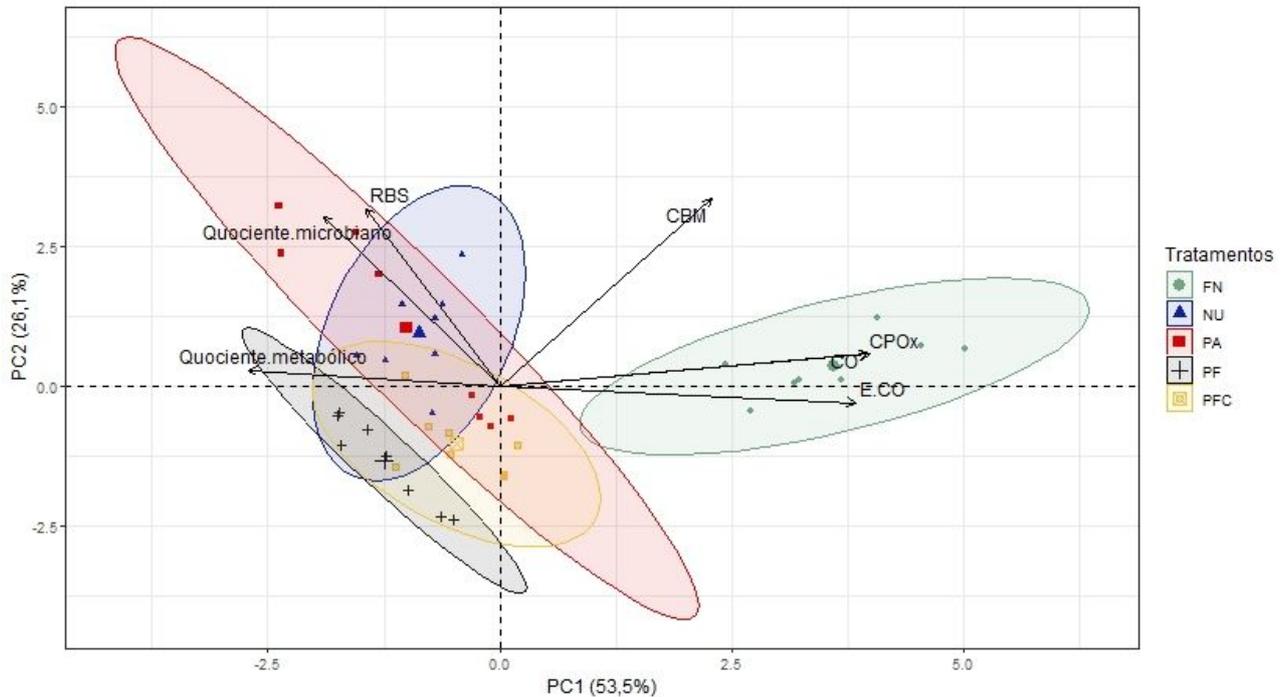


CO – carbono orgânico do solo, E-CO – estoque de carbono orgânico, CPOx – Carbono Oxidável, CBM – carbono da biomassa microbiana, RBS – respiração basal do solo.

Os tratamentos no Tecnosolo se distanciaram do ecossistema de referência (Figura 16). As componentes 1 e 2 explicaram respectivamente 53,5% e 26,1%. A área FN se localizou positivamente na componente 1, enquanto os tratamentos no Tecnosolo foram majoritariamente localizados negativamente na componente, onde o tratamento que mais distanciou de FN foi PF. Ademais, FN se relacionou principalmente às variáveis E-CO, CO, CPOx e CBM, já os tratamentos

PA e NU ficaram mais associados às variáveis quociente microbiano e RBS. Para quociente metabólico, houve uma aproximação de PF.

Figura 16 – Biplot da análise de componentes principais das variáveis estudadas com os tratamentos e a floresta nativa.



CO – carbono orgânico do solo, E-CO – estoque de carbono orgânico, CPOx – Carbono Oxidável, CBM – carbono da biomassa microbiana, RBS – respiração basal do solo. FN – Florestal Nativa, NU – Nucleação, PA – Plantio Adensado, PF – Plantio Florestal, PFC – Plantio Florestal com Calagem.

6.4 Discussão

O solo possui elevada capacidade de armazenar carbono em sua forma orgânica (Minasny *et al.*, 2017). Contudo, com a remoção, transporte, mistura e armazenamento do solo usado para construção do Tecossolo, há a perturbação estrutural, provocando a perda de agregados, liberando frações menos estabilizadas da matéria orgânica e facilitando a sua oxidação (Bonifacio *et al.*, 2024; Hok *et al.*, 2015; Six; Paustian, 2014). Com isso, é esperado que ocorra maiores valores de carbono orgânico, estoque de carbono, carbono oxidável e carbono da biomassa microbiana no ecossistema de referência, visto que: (I) há maior proteção da matéria orgânica pelos agregados; e (II) a menor perturbação ao solo que favorece o crescimento e o estabelecimento de microrganismos no solo (Bastos *et al.*, 2023; Bonifacio *et al.*, 2024; D'Andréa *et al.*, 2002; Sae-Tun *et al.*, 2022). Estando de acordo com a correlação positiva entre essas variáveis, pois os mesmos fatores parecem influenciar nas variáveis. Entretanto, as alterações no teor de carbono orgânico não foram

perceptíveis após 3 anos da adoção dos métodos para recuperação da área degradada. Isso se deve a uma menor resposta do carbono orgânico em solos arenosos a curto prazo (Sparling, 1992). Entretanto, ressalta-se que pequenas alterações no estoque de carbono no solo têm um papel fundamental na mitigação das emissões de gases do efeito estufa (GEE) (Minasny *et al.*, 2017). O maior estoque de carbono em PA, para profundidade 0-10 cm, pode estar relacionado à renovação do sistema radicular, visto que foi plantado com uma maior densidade (3 plantas m²), adicionando carbono ao solo após sua decomposição (Dietzel; Liebman; Archontoulis, 2017; Guo *et al.*, 2005; Hassan *et al.*, 2019). Com isso, o tratamento PA se destacou em termos de estoque de carbono orgânico.

O carbono oxidável é associado às frações da matéria orgânica como a lignina, proteínas e exsudatos de raízes (Gomes *et al.*, 2021; Skjemstad; Swift; McGowan, 2006). Com isso, sugere-se que os maiores valores em PA estão associados à liberação de exsudatos pelo sistema radicular mais denso e, em NU, à deposição de resíduo de supressão, que adiciona ao solo material rico em lignina na profundidade de 0-10 cm. Em um estudo em sistema agroflorestal, o aumento no carbono oxidável foi atribuído às podas regulares de espécies como *Theobroma cacao* L., *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp e *Elaeis guineensis* Jacq., por adicionar material rico em lignina ao solo (Gomes *et al.*, 2021). Além disso, os valores de CPOx maiores em PFC se devem indiretamente à incorporação de calcário na área, visto que a prática melhora a qualidade do solo, promovendo o crescimento radicular de espécies ao disponibilizar nutrientes (cálcio e magnésio) e insolubilizando o alumínio (Aide, 2022; Kopittke *et al.*, 2016; Kopittke; Blamey, 2016). Assim, sugere-se que em PFC: (I) o aumento no crescimento das raízes em maiores profundidades aumenta a produção de exsudatos e, conseqüentemente, o carbono oxidável do solo; e (II) com a renovação do sistema radicular, há um favorecimento do aumento do conteúdo de carbono em profundidade (Dietzel; Liebman; Archontoulis, 2017). Assim, para o carbono oxidável, os tratamentos NU e PA foram os que obtiveram melhores resultados para profundidade de 0 – 10 cm e o PFC para o de 10-20 cm.

A aplicação dos resíduos oriundos da supressão vegetal no tratamento NU teve efeito positivo no carbono da biomassa microbiana, pois, a aplicação de resíduos orgânicos eleva o fornecimento de energia para os microrganismos, ocasionando o aumento da biomassa microbiana (Bolo *et al.*, 2021; de Paiva *et al.*, 2022; Ekenler; Tabatabai, 2003). Ademais, a maior diversidade de espécies em PA e NU também influenciou positivamente a biomassa microbiana, uma vez que diversifica as relações entre microrganismos e plantas, além de adicionar fontes de material orgânico diversificados ao sistema (Bastos *et al.*, 2023; D'Andréa *et al.*, 2002). A incorporação de

calcário no Tecno solo em PFC também ocasionou o aumento do carbono microbiano. No geral, há inicialmente a queda do carbono microbiano com a calagem, mas aumenta ao longo do tempo (Bolo *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2014), devido à melhora na qualidade do solo (Aide, 2022), proporcionando o aumento no fornecimento de matéria orgânica pela renovação das raízes e liberação de exsudatos, culminando no aumento da biomassa microbiana do solo (Ekenler; Tabatabai, 2003). Em um estudo com pomares e solos florestais na China, foi observado o aumento na diversidade da comunidade microbiana utilizando o índice de diversidade de Shannon após calagem (Xue *et al.*, 2010).

A respiração basal do solo indica a oxidação da matéria orgânica pelos microrganismos aeróbicos, sendo influenciado por fatores bióticos (população microbiana, matéria orgânica e simbiose) e fatores abióticos (temperatura e umidade) (Araújo; Monteiro, 2007; Fenn; Malhi; Morecroft, 2010; Macedo *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2015). Nesse sentido, a atividade microbiana aumenta com o crescimento da população microbiana, sendo observado na correlação positiva da respiração basal do solo com o carbono microbiano. Isso pode explicar os maiores resultados da variável em NU e PA. A maior respiração basal pode significar: (I) o aumento da liberação de nutrientes oriundos da decomposição da matéria orgânica (de Paiva *et al.*, 2022; Kok *et al.*, 2022); e (II) pode indicar a perda de carbono na forma de CO₂ para a atmosfera (Islam; Weil, 2000; Jakab *et al.*, 2023). A perda do carbono para a atmosfera está ocorrendo em PF, sendo evidenciado pelo elevado valor do quociente metabólico aliado ao baixo quociente microbiano, indicando uma menor imobilização de carbono pelos microrganismos (Barreto-Garcia *et al.*, 2021). Os valores elevados da variável estão associados a uma condição de estresse para microbiota do solo (Lopes *et al.*, 2021). Portanto, sugere-se que os tratamentos PFC, PA e NU favorecem o desenvolvimento microbiano, por melhorar a qualidade do solo. Com os resultados, fica evidente que a liberação da matéria orgânica dos agregados do solo devido à degradação do solo usado na construção do Tecno solo ocasionou o aumento da atividade microbiana do solo e, conseqüentemente, da emissão de CO₂ (Fiedler *et al.*, 2016). Ademais, apesar de os valores do quociente microbiano estarem relacionados à maior eficiência dos microrganismos em usar o carbono orgânico do solo (Bastos *et al.*, 2023; Sparling, 1992), outros indicadores mostram uma condição de menor qualidade ao comparar com a área de referência. Tendo em vista que os indicadores devem ser analisados em conjunto (Araújo; Monteiro, 2007), não se pode afirmar que há uma melhor qualidade dos tratamentos em comparação com a área de referência.

A análise de componentes principais apontou para um distanciamento dos tratamentos no Tecnosolo à área de floresta. Entretanto, estudo de cronossequência de um Tecnosolo apontou para o aumento no estoque de carbono e melhora nos indicadores microbiológico com o aumento da idade (Ahirwal *et al.*, 2018), assim, se espera que com o distanciamento dos tratamentos em relação ao ecossistema de referência diminua com o aumento da idade. Ademais, a maior associação do CO, E-CO, CPOx e CBM em FN e a maior do quociente metabólico e RBS com os tratamentos apontam para uma menor qualidade do substrato nos tratamentos do Tecnosolo, o que corrobora com a explicação da elevada degradação dos agregados do solo, liberando formas menos estabilizadas da matéria orgânica do solo, que serão decompostas pelos microrganismos, liberando CO₂ (Bonifacio *et al.*, 2024; Fiedler *et al.*, 2016; Hok *et al.*, 2015; Six; Paustian, 2014). Assim, o Tecnosolo ainda difere do solo do ecossistema de referência quanto as variáveis estudadas, mas é importante destacar que o Tecnosolo possui o potencial de recuperar às funções do solo perdidas com a mineração com o aumento de sua qualidade (Ruiz; Cherubin; Ferreira, 2020).

6.5 Conclusão

Com isso, se nota que o estoque de carbono e os indicadores microbianos no Tecnosolo ainda não chegam a valores considerados semelhantes ao dos encontrados no ecossistema de referência no terceiro ano de recuperação. Entretanto, mesmo com a incorporação de calcário em PFC causando efeito positivo, as técnicas NU e PA foram destaques para as variáveis estudadas, ou seja, o uso de resíduos orgânicos e uma alta densidade favoreceram o estoque de carbono e os indicadores microbiológicos, especialmente para NU.

REFERÊNCIAS

- AHIRWAL, Jitendra *et al.* Reclamation of coal mine spoil and its effect on Technosol quality and carbon sequestration: a case study from India. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 28, p. 27992–28003, 2018.
- AIDE, Michael. Aluminum Soil Chemistry: Influence on Soil Health and Forest Ecosystem Productivity. **Agricultural Sciences**, v. 13, n. 8, p. 917–935, 2022.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANA. **Hidroweb**. 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 3 mar. 2024.

- ANDERSON, Traute-Heidi; DOMSCH, K H. The metabolic quotient for co, (qc02) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as ph, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biol. Biochem**, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- ARAÚJO, Ademir Sérgio Ferreira de; MONTEIRO, Regina Teresa Rosim Monteiro. Indicadores biológicos de qualidade do solo biological indicators of soil quality. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, p. 66–75, 2007.
- BARRETO-GARCIA, Patrícia Anjos Bittencourt *et al.* Short-term effects of forest management on soil microbial biomass and activity in caatinga dry forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 481, p. 118790, 2021.
- BASTOS, Tatiana Reis dos Santos *et al.* Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **Catena**, v. 230, p. 107270, 2023.
- BOLO, Peter *et al.* Application of residue, inorganic fertilizer and lime affect phosphorus solubilizing microorganisms and microbial biomass under different tillage and cropping systems in a Ferralsol. **Geoderma**, v. 390, p. 114962, 2021.
- BONDEAU, Alberte *et al.* Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. **Global Change Biology**, v. 13, n. 3, p. 679–706, 2007.
- BONIFACIO, Eleonora *et al.* Soil and management effects on aggregation and organic matter dynamics in vineyards. **Soil and Tillage Research**, v. 240, p. 10607, 2024.
- CHENU, Claire *et al.* Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. **Soil and Tillage Research**, v. 188, p. 41–52, 2019.
- COSTA, Giancarlo Dalla *et al.* Influência Da Adubação Nos Atributos Microbiológicos Do Solo Na Produção De Milho Silagem. **Synergismus scyentifica UTFPR**, v. 9, n. 1, 2014.
- D'ANDRÉA, A. F. *et al.* Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região do cerrado no sul do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 913–923, 2002.
- DE PAIVA, Aparecida Barbosa *et al.* Chemical and microbiological attributes of sandy soil fertilized with crushed green coconut shell. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. 1–10, 2022.

DIETZEL, Ranae; LIEBMAN, Matt; ARCHONTOULIS, Sotirios. A deeper look at the relationship between root carbon pools and the vertical distribution of the soil carbon pool. **SOIL**, v. 3, n. 3, p. 139–152, 2017.

DON, Axel *et al.* Carbon sequestration in soils and climate change mitigation—Definitions and pitfalls. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, p. e16983, 2024.

EKENLER, M.; TABATABAI, M. A. Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 39, n. 1, p. 51–61, 2003.

FENG, Yu *et al.* Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 191, p. 12-25, 2019.

FENN, Katherine M.; MALHI, Yadvinder; MORECROFT, Michael D. Soil CO₂ efflux in a temperate deciduous forest: Environmental drivers and component contributions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 10, p. 1685–1693, 2010.

FIEDLER, Sebastian Rainer *et al.* Tillage-induced short-term soil organic matter turnover and respiration. **SOIL**, v. 2, n. 3, p. 475–486, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World reference base for soil resources 2014 : international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. FAO, 2014.

FROUZ, Jan. Soil recovery and reclamation of mined lands. *In: SOILS AND LANDSCAPE RESTORATION*. 1. ed. Academic Press: Elsevier, 2021. p. 161–191.

GEE, G W; BAUDER, J W. Particle-size Analysis. *In: KLUTE, Arnold (org.). Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2. ed. New York: American Society of Agronomy, p. 383–411, 1986.

GOMES, Mila Façanha *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.

GRISCOM, Bronson W. *et al.* Natural climate solutions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 44, p. 11645–11650, 2017.

- GUO, L. B. *et al.* Fine root production and litter input: Its effects on soil carbon. **Plant and Soil**, v. 272, n. 272, p. 1–10, 2005.
- GUPTA, Sanatan Das; KIRBY, William; PINNO, Bradley D. Effects of Stockpiling and Organic Matter Addition on Nutrient Bioavailability in Reclamation Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, p. S27-S41, 2019.
- HASSAN, Sawsan *et al.* Root growth and soil carbon turnover in *Opuntia ficus-indica* as affected by soil volume availability. **European Journal of Agronomy**, v. 105, p. 104–110, 2019.
- HOK, Lyda *et al.* Short-term conservation agriculture and biomass-C input impacts on soil C dynamics in a savanna ecosystem in Cambodia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 214, p. 54–67, 2015.
- IBGE. **Geociência**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- ISLAM, K R; WEIL, R R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biol Fertil Soils**, v. 27, p. 408–416, 1998.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 79, n. 1, p. 9–16, 2000.
- JAKAB, Gergely *et al.* Soil organic matter gain by reduced tillage intensity: Storage, pools, and chemical composition. **Soil and Tillage Research**, v. 226, p. 105584, 2023.
- JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—a method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, n. 3, p. 209–213, 1976.
- KOK, D. D. *et al.* Relationships of priming effects with organic amendment composition and soil microbial properties. **Geoderma**, v. 422, p. 115951, 2022.
- KOPITTKE, Peter M. *et al.* Kinetics and nature of aluminium rhizotoxic effects: A review. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 15, p. 4451–4467, 2016.
- KOPITTKE, Peter M.; BLAMEY, F. Pax C. Theoretical and experimental assessment of nutrient solution composition in short-term studies of aluminium rhizotoxicity. **Plant and Soil**, v. 406, n. 1–2, p. 311–326, 2016.

- LAL, Rattan. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 815-830, 2008.
- LAL, Rattan; NEGASSA, Wakene; LORENZ, Klaus. Carbon sequestration in soil. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 15, p. 79-86, 2015.
- LOPES, Lucas Dantas *et al.* Shifts in microbial and physicochemical parameters associated with increasing soil quality in a tropical Ultisol under high seasonal variation. **Soil and Tillage Research**, v. 206, p. 104819, 2021.
- MA, Zhengbo *et al.* Long-term green manuring increases soil carbon sequestration via decreasing qCO₂ caused by lower microbial phosphorus limitation in a dry land field. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 374, p. 109142, 2024.
- MACDONALD, S. Ellen *et al.* Early trajectories of forest understory development on reclamation sites: Influence of forest floor placement and a cover crop. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 5, p. 698–706, 2015.
- MACEDO, Rodrigo Santana *et al.* Effects of Degradation on Soil Attributes Under Caatinga in The Brazilian Semi-Arid. **Revista Arvore**, v. 47, p. e4702, 2023.
- MINASNY, Budiman *et al.* Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59-86, 2017.
- MIYAWAKI, Akira; GOLLEY, Frank B. Forest reconstruction as ecological engineering. **Ecological Engineering**, v. 2, p. 333–345, 1993.
- MORENO-BARRIGA, Fabián *et al.* Organic matter dynamics, soil aggregation and microbial biomass and activity in Technosols created with metalliferous mine residues, biochar and marble waste. **Geoderma**, v. 301, p. 19–29, 2017.
- NAZIR, Muhammad Junaid *et al.* Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture. **Soil and Tillage Research**, v. 237, p. 105959, 2024.
- NTINYARI, Winnie; GWEYI-ONYANGO, Joseph P. Greenhouse Gases Emissions in Agricultural Systems and Climate Change Effects in sub-Saharan Africa. *In: AFRICAN HANDBOOK OF CLIMATE CHANGE ADAPTATION*. Cham: Springer International Publishing, p. 1–25, 2021.
- OLSON, Kenneth R. Impacts of tillage, slope, and erosion on soil organic carbon retention. **Soil Science**, v. 175, n. 11, p. 562–567, 2010.

R CORE TEAM. **A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 30 jun. 2024.

REES, Frédéric *et al.* Storage of carbon in constructed technosols: in situ monitoring over a decade. **Geoderma**, v. 337, p. 641–648, 2019.

RUIZ, Francisco; CHERUBIN, Maurício Roberto; FERREIRA, Tiago Osório. Soil quality assessment of constructed Technosols: Towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. **Journal of Environmental Management**, v. 276, p. 111344, 2020.

SAE-TUN, Orracha *et al.* Fungal biomass and microbial necromass facilitate soil carbon sequestration and aggregate stability under different soil tillage intensities. **Applied Soil Ecology**, v. 179, p. 104599, 2022.

SISTI, Claudia P.J. *et al.* Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39–58, 2004.

SIX, Johan; PAUSTIAN, Keith. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. A4-A9, 2014.

SKJEMSTAD, J. O.; SWIFT, R. S.; MCGOWAN, J. A. Comparison of the particulate organic carbon and permanganate oxidation methods for estimating labile soil organic carbon. **Australian Journal of Soil Research**, v. 44, n. 3, p. 255–263, 2006.

SPARLING, G P; WEST, A W. A Direct Extraction Method To Estimate Soil Microbial C: Calibration In Situ Using Microbial Respiration And " ¹⁴C Labelled Cells. **Soil Biology. Biochemistry**, v. 20, n. 3, p. 337–343, 1988.

SPARLING, Graham P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**, v. 30, n. 2, p. 195–207, 1992.

TEIXEIRA, Paulo César *et al.* (org.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br>.

- UNFCCC. **The Paris Agreement, What is the Paris Agreement?**, 2015. Disponível em: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwqMO0BhA8EiwAFTLgIMRxrOVEIMErrXfGviZFHLEngobO11CN65eW17QtTL8Xiu23TbpnGxoCSpQQA_vD_BwE. Acesso em: 11 jul. 2024.
- VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175–180, 1994.
- WALKLEY, A; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.
- WEIL, Ray R *et al.* Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 18, n. 1, p. 3–17, 2003. Disponível em:
- XUE, Dong *et al.* Effect of lime application on microbial community in acidic tea orchard soils in comparison with those in wasteland and forest soils. **Journal of Environmental Sciences**, v. 22, n. 8, p. 1253–1260, 2010.
- YU, Lei *et al.* Quantifying components of soil respiration and their response to abiotic factors in two typical subtropical forest stands, southwest China. **PLoS ONE**, v. 10, n. 2, 2015.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os indicadores estudados no trabalho foram eficientes para avaliar a qualidade do Tecnosolo sob diferentes técnicas de recuperação de áreas degradadas. Para o tempo de recuperação de três anos, os efeitos das técnicas avaliadas no estudo ainda não assemelharam as características do Tecnosolo com as do solo do ecossistema de referência. Mas, os tratamentos diferiram entre si, com as práticas de manejo adotado influenciando os indicadores de uma determinada propriedade do Tecnosolo, onde: a incorporação de calcário influenciou positivamente os indicadores químicos do Tecnosolo; a menor entrada de maquinário em PA favoreceu os indicadores físicos e o maior número de espécies plantadas favoreceram o carbono e os indicadores microbiológicos; e o uso de resíduos de supressão na construção dos núcleos em NU, teve efeito significativo no carbono e nos indicadores microbiológicos do solo. Entretanto, é necessário ter o acompanhamento a longo prazo para avaliar a evolução da qualidade e do carbono no Tecnosolo sob as diferentes técnicas de recuperação de áreas degradadas.

APÊNDICE A - p-valor dos contrastes avaliados pelo teste Dunnett para as propriedades físicas do solo. DS – densidade do solo; PT – porosidade total; RP – resistência a penetração

Contrastes	DS	PT	RP	Argila	Silte	Areia
NU-FN	0,003400	0,003400	0,000000	0,056710	0,000000	0,001400
PA-FN	0,082800	0,082800	0,353400	0,000056	0,000000	0,000000
PF-FN	0,097100	0,097300	0,000000	0,000081	0,000000	0,000004
PFC-FN	0,079100	0,079100	0,000069	0,000470	0,000300	0,000030

APÊNDICE B - p-valor dos contrastes avaliados pelo teste Dunnett para as propriedades químicas do solo. MO – matéria orgânica; P – fósforo; K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al – alumínio; AP – acidez potencial; SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca catiônica; V – saturação por bases; m – saturação por alumínio.

Contrastes	MO	pH	P	K	Ca	Mg	Al	AP	SB	CTC	V	m
NU-FN	0,000000	0,001500	0,002900	0,020000	0,247790	0,999000	0,000000	0,000000	0,664600	0,001700	0,005600	0,000130
PA-FN	0,000000	0,081300	0,999900	0,100000	0,448390	0,210200	0,000037	0,000003	0,251800	0,000200	0,994000	1,000000
PF-FN	0,000000	0,069200	0,016700	0,010000	0,993670	0,168000	0,000370	0,000002	0,619300	0,002800	0,563100	0,938130
PFC-FN	0,000000	0,000000	0,005300	0,003000	0,000340	0,003200	0,000000	0,000000	0,000400	0,015100	0,000000	0,000000

APÊNDICE C – p-valor dos contrastes avaliados pelo teste Dunnett para as variáveis: CO – carbono orgânico; CPOx – carbono oxidável; E-CO – estoque de carbono; CBM – carbono da biomassa microbiana; RBS – respiração basal do solo; qMIC – quociente microbiano; qCO₂ – quociente metabólico.

Contrastes	CO	CPOx	E-CO	CBM	RBS	qMIC	qCO ₂
	0-10 cm						
NU-FN	0,000000	0,000000	0,000001	0,088400	0,001400	0,000780	0,000001
PA-FN	0,000000	0,000000	0,000001	0,000008	0,975700	0,413660	0,000002
PF-FN	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,063000	0,999880	0,000000
PFC-FN	0,000000	0,000000	0,000000	0,000035	0,040900	0,003900	0,998500
10-20 cm							
NU-FN	0,000000	0,000000	0,000008	0,000300	0,001700	0,277600	0,000190
PA-FN	0,000000	0,000000	0,000000	0,907000	0,000026	0,000000	0,004490
PF-FN	0,000000	0,000000	0,000019	0,000000	0,641600	0,760400	0,002150
PFC-FN	0,000000	0,000000	0,000000	0,000002	0,267400	0,681900	0,926580