



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

VICENTE SANTOS DE SOUSA

**RESÍDUOS ORGÂNICO PARA ENRIQUECIMENTO DO ESTÉRIL EMPREGADO
NA CONSTRUÇÃO DE TECNOSSOLO EM MINA DE BAUXITA**

BELÉM-PA
2023

RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA ENRIQUECIMENTO DO ESTÉRIL EMPREGADO NA CONSTRUÇÃO DE TECNOSSOLO EM MINA DE BAUXITA

Trabalho de Defesa da Dissertação de Mestrado apresentado a Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Manejo e conservação de recursos ambientais, para obter o título de mestre.

Orientador: Dr. Norberto Cornejo Noronha

Coorientador: Dr. Marcos André Piedade Gama

BELÉM-PA

2023

VICENTE DOS SANTOS DE SOUSA

**RESÍDUOS ORGÂNICOS PARA ENRIQUECIMENTO DO ESTÉRIL EMPREGADO
NA CONSTRUÇÃO DE TECNOSSOLO EM MINA DE BAUXITA**

Trabalho de Defesa da Dissertação de Mestrado apresentado à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Manejo e conservação de recursos ambientais, para obter o título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha

Coorientador: Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama

Data de defesa:

BANCA EXAMINADORA:

Presidente: Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha

Membro interno do programa: Prof. Dr. Silvio Junior Ramos

Membro externo do programa: Profa. Dra. Vânia Silva Melo

Membro externo à instituição: Prof. Dr. Sérgio Miana de Faria

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 NORBERTO CORNEJO NORONHA
Data: 18/07/2023 17:58:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha – Presidente
(Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA)

Documento assinado digitalmente
 SILVIO JUNIO RAMOS
Data: 17/07/2023 08:53:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Silvio Junio Ramos – Membro Interno do Programa
(Instituto Tecnológico Vale – ITV)

Documento assinado digitalmente
 VANIA SILVA DE MELO
Data: 18/07/2023 17:06:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Vânia Silva Melo - Membro Externo do Programa
(Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA)

Documento assinado digitalmente
 SERGIO MIANA DE FARIA
Data: 14/07/2023 15:54:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sérgio Miana de Faria – Membro Externo da Instituição
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA - Agrobiologia)

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, pois devo a esta instituição a minha formação científica e o título de Mestre.

À Mineração Paragominas pertencente ao grupo Norsk Hydro, pois acreditou e investiu no projeto de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha e Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama, meu orientador e coorientador, respectivamente pelas orientações e contribuições significativas nesse trabalho além da amizade.

Aos membros da banca por aceitarem o convite e participarem desse momento tão importante.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – PPGAGRO pela oportunidade de realizar esta pós-graduação.

A minha filha (Ayla Vitória), esposa (Aláina Lima), Minha prima (Ana Claudia) aos meus pais (Janete, Juarez e Rosa) e irmãos (Aline, Camila, Carol, João e Maria), por sempre acreditarem e apoiarem o projeto.

RESUMO

Um dos maiores desafios da mineração de bauxita é garantir o restabelecimento da vegetação da área pós lavra do minério. O desafio é intensificado nos casos em que o topsoil não é disponível para a construção do solo de mina, fazendo-se necessária a busca de técnicas para a melhoria do estéril e assim garantir as condições do estabelecimento vegetal e, conseqüentemente, obter a cobertura do solo nos estágios iniciais de recuperação da área minerada. O objetivo deste trabalho foi encontrar a dose e a fonte mais eficiente de matéria orgânica (M.O.) a ser incorporada ao substrato para promover a melhoria dos atributos físicos e químicos do estéril e garantir o desenvolvimento da planta indicadora. Foram utilizadas duas fontes de M.O. a saber: resíduos de madeira da supressão (M) e resíduos do refeitório (R) oriundos das atividades da empresa, em três dosagens 10, 20 e 40 t/ha⁻¹ e uma testemunha (TT), o que compôs sete tratamentos com 5 repetições, dispostos em DBC. Como planta indicadora utilizou-se o feijão guandu (*Cajanus cajan*). Os parâmetros avaliados foram os atributos físicos: Densidade (Ds) e Porosidade Total (Pt) e; Atributos químicos nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm. As variáveis relacionadas à planta indicadora foram: biomassa seca e altura aos 6 e 14 meses de condução do experimento. Os dados foram submetidos à ANOVA e as médias comparadas por Tukey a 5% no programa Rstudio. Em ambos os períodos de amostragem (6 e 14 meses), as doses de 20 e 40 t ha⁻¹ R e 40 t ha⁻¹ M proporcionaram acréscimo significativo de altura e aumento de biomassa seca da planta com relação à TT. Das variáveis químicas foram detectadas diferenças estatísticas para o carbono orgânico (Corg) e para a CTC potencial na camada 0-5cm (p-valor < 0,05). Para o Corg os tratamentos 40 t ha⁻¹ M e 40 t ha⁻¹ R foram as doses maximizadoras, logo, diferenciam-se da TT. Em relação à CTC do solo, somente a dosagem de 40 t ha⁻¹ M se diferenciou estatisticamente de TT somente na camada superficial aos 6 meses. Para os outros atributos químicos e nas demais profundidades analisadas não houve diferenças estatísticas de TT Até o final do período experimental a Ds e Pt não responderam às doses e fontes de M.O. utilizadas. A incorporação de resíduos orgânicos ao estéril nas doses de 20 e 40 t ha⁻¹ R e 40 t ha⁻¹ M proporcionaram ganhos de altura na época da primeira floração do guandu. No entanto 20 e 40 t ha⁻¹ R proporcionaram maiores valores de biomassa seca da planta indicadora, apresentando o melhor desempenho no final do ciclo experimental; A incorporação de 40 t ha⁻¹ M e 40 t ha⁻¹ R ao estéril apresentou efeito positivo no Corg em ambos períodos amostrais e 40 t ha⁻¹ M afetou positivamente a CTC apenas aos 6 meses; Portanto, as doses de 20 e 40 t ha⁻¹ R e 40 t ha⁻¹ M misturadas ao estéril são as mais promissoras para o aumento do conteúdo de carbono no solo e as doses ≥ 20 t ha⁻¹ R foram as que propiciaram ganhos de altura e biomassa seca do guandu, apresentando o melhor desempenho no o fim do ciclo experimental.

Palavras chaves: estéril de mineração de bauxita; tecnossolo; guandu; recuperação de área degradada; resíduos orgânicos.

ABSTRACT

One of the biggest challenges in bauxite mining is to ensure the reestablishment of vegetation in the post-mining area. The challenge is intensified in cases where topsoil is not available for the construction of the mine soil, being necessary to search for technologies to improve the bauxite mine spoil and thus guarantee the conditions of the plant establishment and, consequently, obtain the coverage of the soil in the initial stages of recovery of the mined area. The objective of this work was to find the most efficient dose and source of organic matter (O.M.) to be incorporated into the substrate to promote the improvement of the spoil's physical and chemical attributes and ensure the development of the indicator plant. Two sources of M.O. namely: wood residues from suppression (WS) and dehydrated food residues (FR) from the company's activities, in three dosages 10, 20 and 40 t/ha⁻¹ and a control (TT), which comprised seven treatments with 5 repetitions, arranged in CBD. Pigeon pea (*Cajanus cajan*) was used as an indicator plant. The evaluated parameters were the physical attributes: Density (Ds) and Total Porosity (Pt) and; The chemical attributes in layers 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm. The variables related to the indicator plant were: plant dry biomass and height at 6 and 14 months of the experiment. Data were submitted to ANOVA and means compared by Tukey at 5% in the R-studio program. In both sampling periods, doses of 20 and 40t ha⁻¹ FR and 40 t ha⁻¹ WS provided a significant increase in plant height and dry biomass in relation to TT. From the chemical variables, statistical differences were detected for the organic C (orgC) and for the potential CTC in the 0-5cm layer (*p-value* < 0.05). For orgC, the treatments 40 t ha⁻¹ WS and 40 t/ha⁻¹ FR were the maximizing doses, thus different from TT. Regarding soil CEC, only the dosage of 40 t ha⁻¹ WS was statistically different from TT only in the superficial layer at 6 months. For the other chemical attributes and at the other analyzed depths, there were no statistical differences in TT. Until the end of the experimental period, Ds and Pt did not respond to doses and sources of M.O. used. The incorporation of organic residues to the spoil at doses of 20 and 40 t ha⁻¹ R and 40 t ha⁻¹ M provided gains in height at the time of the first flowering of pigeon pea. However, 20 and 40 t ha⁻¹ R provided higher values of dry biomass of the indicator plant, presenting the best performance at the end of the experimental cycle; ; The incorporation of 40 t ha⁻¹ WS and 40 t ha⁻¹ FR to the spoil had a positive effect on orgC in both sampling periods and 40 t ha⁻¹ WS positively affected CTC only at 6 months; Therefore, doses of 20 and 40 t ha⁻¹ FR mixed with the bauxite mine spoil are the most promising for increasing the carbon content in the soil and producing plant dry biomass.

Keywords: bauxite mine spoil; technosol; pigeon pea; recovery of degraded area; organic residues.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização do Município de Paragominas.....	14
Figura 2 – Ilustração do processo de lavra da bauxita.....	15
Figura 3 – Atividade de descompactação e escarificação do solo.....	18
Figura 4 – Visão aérea da distribuição das parcelas em campo.....	19
Figura 5 – Tratamento nas áreas de estudo.....	20
Figura 6 – Semeadura direta do guandu.....	20
Figura 7 – Adubação.....	21
Figura 8 – Floração do feijão guandu.....	22
Figura 9 – Coleta de Biomassa.....	23
Figura 10 – Análise química do solo.....	24
Figura 11 – Altura do feijão guandu aos 6 meses e aos 14 meses de condução do experimento (m).....	32
Figura 12 – Biomassa do feijão guandu aos 6 meses e aos 14 meses de condução do experimento (kg ha^{-1})	33

LISTA DE EQUAÇÃO

Equação 1 – Densidade do solo 22

Equação 2 – Porosidade total do solo 23

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Cracterização dos atributos químicos do estéril.....	15
Tabela 2 – Caracterização dos atributos químicos dos resíduos – Resíduo Desidratado do Refeitório	16
Tabela 3 – Resultados de densidade e porosidade total do solo:.....	26
Tabela 4 – Atributos químicos do tecnossolo avaliados aos 6 e 14 meses do experimento:.....	30

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Histórico e descrição e das atividades do projeto:.....	18
Quadro 2 – Tratamentos executados na área experimental:.....	19

LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SÍMBOLOS

MO	Matéria orgânica
SB	Soma das bases
pH	Potencial hidrogeniônico
CTC	Capacidade da troca de cátions
NC	Necessidade de Calcário
V ¹	Porcentagem de saturação por bases atual do solo, calculada pela
V ²	Porcentagem de saturação por bases recomendada para a cultura (50%).
N	Nitrogênio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
K	Potássio
Al	Alumínio
PT	Porosidade total do solo
Ds	Densidade do solo
Corg	Carbono Orgânico
DBC	Delineamento de Blocos Casualizados

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 A mineração no Brasil.....	4
3.2 Legislação para mineração.....	5
3.3 Extração de minério em céu aberto e seus impactos no solo.....	6
3.4 Contribuição da matéria orgânica para formulação do tecnossolo.....	9
3.5 Ações para a recuperação ambiental.....	11
3.6 Espécies vegetais como condicionadoras do tecnossolo.....	12
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4.1 Área de Estudo.....	13
4.2 Histórico da Área.....	16
4.3 Amostragens de solo e do material vegetal.....	21
4.4 Análise de solo.....	23
4.4.2 Análise estatística.....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5.1 Densidade porosidade total do solo.....	25
5.2 Fertilidade do solo.....	27
5.3 Altura e biomassa seca do feijão guandu.....	32
6. CONCLUSÕES.....	34
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

Um dos setores que mais movimentam a economia do Brasil é a mineração. Em 2021 o saldo com exportações chegou US\$ 49 bilhões somente com o setor mineral, isso resulta em um crescimento econômico de 51% em comparação com o ano anterior e mostra que a mineração teve sua importância para garantir o saldo positivo da balança comercial brasileira, mesmo com a pandemia do covid-19. Quando nos referimos ao potencial de produção mineral da matéria prima do alumínio (bauxita), o território brasileiro tem a quarta maior reserva de bauxita do mundo (REVISTA DO ALUMÍNIO, 2021). No ano 2018 o país chegou a produzir 32 milhões de toneladas do minério, sendo que grande parte desse volume foi industrializado no Estado do Pará, assim gerando tributos e ofertas de empregos (ABAL, 2019). Em Paragominas no Estado do Pará - onde está localizada a mineradora, alvo do estudo, o empreendimento contribui fortemente com geração de 1.547 empregados diretos e mais de 815 indiretos (O LIBERAL, 2022), alavancando a economia do Município com pagamentos de tributos fiscais.

Muito embora o setor minerário seja de grande importância econômica para o país, os impactos ambientais decorrentes das atividades desenvolvidas na mineração são inegáveis. Assim, para se praticar a extração do minério, a empresa mineradora é obrigada a atender a Lei n. 6.938 de 1981 que inseriu ordenamento jurídico no Brasil e atribuiu responsabilidades ao poluidor para que este fixe ferramentas que possibilitem a recuperação dos danos gerados pela atividade poluidora, com o intuito de promover o equilíbrio entre o direito minerário de lavra e a preservação do meio ambiente (BARREIRA, 2015). Contudo, a recuperação da área depende de vários fatores como disponibilidade de insumos, mão de obra, equipamentos e recursos naturais como sementes e a camada superficial do solo denominado de *topsoil*.

No caso da mineração de bauxita a céu aberto, após a extração do minério de interesse, a superfície do terreno é totalmente alterada, permanecendo uma mistura de terra proveniente dos antigos horizontes B e C do solo originário (ISKANDAR et al., 2019), denominada estéril, que tem como principais características a baixa disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica e o rompimento da estabilidade relacionada à gênese do solo originário e sobre o qual passam a atuar novos processos pedogenéticos (KÄMPF et al., 1997; CAMPOS et al., 2003).

O conjunto de alterações, a inexistência do horizonte A sobre a camada de estéril e a instabilidade do novo sistema comumente impossibilita o restabelecimento da vegetação nas áreas altamente impactadas pela mineração. Então para dar condições de regeneração vegetal nestas áreas e acelerar o processo de recuperação, frequentemente uma camada de material proveniente do antigo horizonte A do solo original é espalhada sobre o estéril e geralmente esse material é obtido a partir da supressão de outras áreas de vegetação nativas ou secundária. Em relação ao estéril, esta camada comumente denominada *topsoil* deve apresentar um maior conteúdo de matéria orgânica, nutrientes, organismos e sementes (BARROS et al., 2012). No entanto, muitas vezes o *topsoil* disponível é insuficiente para a recuperação de todas as áreas alteradas pela atividade de mineração, como aponta o relatório Ixoha da Hydro (2022)¹, uma vez que não há volume excedente a ser utilizado no local, ou devido à distância entre a atual supressão florestal (fonte de *topsoil*) e a área a ser recuperada. Desse modo se faz necessário o desenvolvimento de técnicas e alternativas que não necessitem da utilização do *topsoil*, ou que diminua a dependência desse recurso natural.

Na ausência de *topsoil* disponível para a cobertura do estéril, uma das alternativas para a melhoria das propriedades químicas e físicas do tecnossolo é a incorporação da matéria orgânica (M.O.) no substrato. Mesmo em quantidade inferior quando comparado com a massa total do solo, a M.O. pode exercer grande influências sobre seus atributos, como na capacidade de troca catiônica – CTC (CANELLAS et al., 2003). Ela está diretamente ligada com fatores químicos, físicos e biológicos do solo, influenciando na capacidade de retenção de água, aeração, pH, densidade do solo, na CTC, atividade microbiana, e metabolismo do solo (XAVIER, 2014). Além de promover a estabilização física, auxiliando na formação de agregados; estabilização química pelas ações eletrostática na atração por cargas opostas (negativas e positivas), atuando como agentes ligantes (NOVAIS et al., 2007) e promovendo a permanência de nutrientes no solo por mais tempo. A M.O. propicia a estabilização biológica, favorecendo atividades de micro-organismos, permitindo o processo de mineralização da M.O. e afetando diretamente o ciclo dos nutrientes (ABBOTT et al., 2007), além de dificultar a perda por lixiviação. Tais ações têm a intenção de tornar as áreas mineradas capazes de suportar o

¹ Relatório interno da Mineração Paragominas S.A., não está disponível.

restabelecimento da vegetação, garantindo a estabilidade física e química do ambiente, ou a reconstrução de um ecossistema autossustentável (SÁNCHEZ, 2011).

Diante dos benefícios que a M.O confere ao solo e do fato que os solos construídos apresentam baixa disponibilidade de M.O. no substrato mineral (estéril) e com base no relatório mensal da Hydro (2022)² que diz que a Mineração Paragominas S.A. - MPSA possui duas fontes de resíduos orgânicos disponíveis para aplicação no substrato mineral, sendo estas: a) resíduo orgânico desidratado proveniente dos refeitórios da mineração e b) resíduos de madeira da supressão em estágio avançado de decomposição, propõe-se a incorporação destes resíduos ao estéril para estudo de sua eficiência nas melhorias dos atributos físicos e químicos do tecnossolo formado e no estabelecimento de uma cobertura vegetal inicial sobre o solo .

Como espécie indicadora foi selecionado o *Cajanus cajan* (Feijão guandu), por pertencer à família das leguminosas, que tem sido indicada em diversas pesquisas científicas como adubo verde, principalmente por seu potencial de fixação de nitrogênio aéreo no solo (COELHO et al., 2007; MOREIRA et al., 2014; CARVALHO et al., 2022). Além desses benefícios do *Cajanus cajan*, a espécie tem a capacidade de se desenvolver em solos que apresentam crostas em sua superfície, apresenta alta resistência ao período seco e o desenvolvimento vertical de suas raízes possibilita a reciclagem de nutrientes das camadas mais profundas; Apresenta um rápido crescimento, promovendo a proteção e cobertura do solo, aumentando a biomassa inicial do sistema, auxiliando o nas melhorias dos atributos físicos-químicos e biológicos do solo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar o enriquecimento do estéril, a partir da incorporação de fontes orgânicas provenientes das atividades da própria mineração, formulando um tecnossolo que garanta condições para o estabelecimento inicial da cobertura vegetal e seja aplicado como uma alternativa na recuperação das áreas mineradas.

² Relatório interno da Mineração Paragominas S.A., não está disponível.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar a melhor fonte e dosagem de resíduos orgânicos a ser incorporada ao estéril para a formulação de um tecnossolo;
- Analisar os efeitos físicos e químicos da incorporação de resíduos orgânicos ao estéril para a formulação do tecnossolo;
- Avaliar o crescimento do feijão guandu na área de tecnossolo formulado com diferentes doses e fontes de resíduos orgânicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A mineração no Brasil

Conforme a humanidade evolui com pesquisas e tecnologia, o conhecimento geológico avança com novas descobertas de depósitos minerais metálicos. Essas descobertas influenciam de modo positivo na economia do país, além de promover progressos no processo industrialização do Brasil, como aponta o Anuário Mineral Brasileiro de 2021. Neste sentido, o Brasil lavra cerca de oitenta minerais em atendimento às demandas do mercado interno e externo (BRASIL, 2021).

No Anuário Mineral Brasileiro (2021), onze substâncias são responsáveis por 99,7% do valor da produção da classe, e são: alumínio (bauxita), cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. Essa produção somada chegou ao valor de 193,5 bilhões de reais em 2020. Dentro do ramo do alumínio, o Brasil ocupa a quarta posição entre os maiores produtores de bauxita do mundo, atrás de Guiné, Austrália e Vietnã, apresentando a quarta maior reserva mineral e é o terceiro país que mais produz de alumina do mundo (USGS, 2020).

Em território nacional o Estado do Pará se destaca por possuir um dos maiores depósitos de bauxita com 90% das reservas, Minas Gerais tem 7%, e o restante está dividido entre os estados de São Paulo e Goiás (PINHEIRO et al. 2016). Neste contexto, Paragominas é um dos municípios paraenses que tem em seu território uma das maiores reservas de bauxita no país (DNPM, 2017).

A exploração da bauxita no Brasil tem aumentado em resposta à demanda global do alumínio. A Associação Brasileira do Alumínio – ABAL (2021) - realizou um levantamento sobre o consumo mundial de alumínio doméstico e constatou que houve

um aumento significativo de 1.583,9 toneladas de alumínio, o que representa um aumento de 10,9%, comparado com o ano de 2020, atingindo o maior volume já registrado desde o início da pesquisa, ano de 1972.

3.2 Legislação para mineração

Mesmo com o balanço positivo para a economia do Brasil e seu potencial produtivo com estoques de bauxita de alta qualidade, as atividades da mineração não estão isentas das obrigações legais e ambientais. A legislação vem se aprimorando e, desse modo, durante o processo de licenciamento, é necessário propor estratégias como alternativas que reduzem os impactos relacionados à extração. Estas devem passar por aprovações e fiscalizações de órgãos ambientais competentes, para assim obter a autorização de exploração mineral. Entre as ações está o Plano de Recuperação de Área Degradada – PRAD (SOARES et al., 2015).

A resolução CONAMA 01/1986, tem como objetivo estabelecer definições, critérios, responsabilidades e diretrizes gerais para a análise de atividades potencialmente poluidoras, que possam ocorrer diante da instalação, operação e desativação de empreendimentos (BRASIL, 1986). A legislação brasileira aponta medidas que são adotadas: evitar, mitigar ou compensar. A medida mais desejável é a de prevenção (evitar), tendo a intenção de não causar danos por meio de iniciativas prévias de planejamento. Caso os danos ambientais sejam inevitáveis, recorre-se a mitigação, ações que reduzem os possíveis impactos. Quando a mitigação é inviável ou o dano já tenha ocorrido, o último recurso é a compensação ambiental (BORBA, 2020).

Existem regulamentos e instrumentos como leis, decretos, sanções entre outros, que dão suporte a fiscalizações dos órgãos competentes. As empresas e áreas de atuação passam por inspeções, a fim de comprovarem a exploração sustentável, que auxiliam no desenvolvimento de ações mitigadoras para a redução dos impactos (SILVA et al., 2021).

A Lei n. 6.938 de 1981 que estabeleceu a Política Nacional do Meio Ambiente, impõem mecanismos importantes de prevenção e proteção ao meio ambiente, direcionada às pessoas físicas e jurídicas que têm a pretensão de utilizar os recursos naturais. É responsabilidade da parte interessada a adequada indenização (quando necessário) e a recuperação da área alterada. O Decreto Nº 97.632 tem a finalidade de

propor normas fundamentais para a prevenção e proteção do meio ambiente, conforme diz o Art. 3º:

A recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente.

Conforme descreve o Manual de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração, conforme IBAMA, 1990:

A degradação de uma área ocorre quando a vegetação nativa e a fauna forem destruídas, removidas ou expulsas; a camada fértil do solo for perdida, removida ou enterrada; e a qualidade e o regime de vazão do sistema hídrico forem alterados. A degradação ambiental ocorre quando há perda de adaptação às características físicas, químicas e biológicas e é inviabilizado o desenvolvimento socioeconômico (IBAMA, 1990, p. 13).

Deste modo, pessoas físicas e jurídicas que pretendem utilizar recursos naturais são obrigadas a atenderem a legislação ao requisito de prevenção e ou proteção do meio ambiente, principalmente nas áreas que sofrem intervenções de forma direta.

3.3 Extração de minério em céu aberto e seus impactos no solo

Daws et al. (2015) ressaltam que a mineração com extração a céu aberto é uma das atividades que mais agride o meio ambiente, por se fazer imprescindível o avanço da supressão vegetal, remoção das camadas edáficas superficiais mais férteis e das camadas subsuperficiais que estão acima do minério de interesse. Ações essas que geram perda de parte da fertilidade e propágulos existentes no solo, levando à diminuição de sua qualidade (MACDONALD et al., 2015).

Desde a década de 80 Schaefer et al. (1980) descreviam as diferenças das características morfológicas dos solos construídos a partir do fim das atividades da mineração, em relação ao solo no estado natural que se desenvolve através de processos naturais de formação e levam milhares de anos para originar os horizontes distintos. Por sua vez, os solos construídos são jovens e desenvolvidos a partir de substratos heterogêneos provenientes das atividades da mineração, constituindo camadas de espessuras diversas ao invés de horizontes e, muitas vezes, sem estruturas granulares no

solo. Estes solos podem ser classificados como *Technosols* (WEB, 2014), que são solos que apresentam propriedades e pedogênese dominadas pela origem técnica.

Kämpf et al., (2000) relatam que, em cenários de durante e pós atividades de mineração, os solos apresentam alterações físicas e baixa disponibilidade de nutrientes e afirmam que estes aspectos afetam negativamente o restabelecimento e desenvolvimento da vegetação. Para estas condições, Barbosa (2006) recomenda avaliações nos quesitos físicos, químicos e biológicos com intuito de diagnosticar o nível de alteração e assim planejar a melhor estratégia de manejo para recuperação. No entanto, se a recuperação ecológica em condições de solos naturais já é um processo difícil em muitos casos, fazendo-se necessária a intervenção humana, quando ela é proposta em solos construídos pós lavra de minério se torna muito mais custosa, devido às drásticas alterações morfológicas, químicas e físicas, o que resulta em limitação ao desenvolvimento de plantas não adaptadas às novas condições ambientais (SOUZA, 2018).

Em pesquisa realizada com tecnossolo formado a partir de estéril e rejeito de uma mineradora de ferro em Minas Gerais, Miao e Marrs (2000) apresentam resultados de baixos teores de macronutrientes, micronutrientes e carbono orgânico, fazendo-se necessários os monitoramentos das condições químicas, especialmente da fertilidade do solo. Costa et al. (2009) reafirmam que os solos construídos em mineração a céu aberto dispõem de baixos teores de matéria orgânica, além de apresentarem baixas concentrações de fósforo e elevada acidez. Essas são condições que colaboram para restringir o desenvolvimento da vegetação, levando em consideração que a maior parte do complexo de troca dos solos construídos está ocupada por H e Al, refletindo a baixa fertilidade do solo. Por outro lado, Kämpf et al. (1997) e Ruivo et al. (2002) acrescentam que os efeitos físicos no solo também necessitam de atenção, uma vez que comumente apresentam várias alterações de estrutura nas camadas superficiais e subsuperficiais, além de compactação devido ao trânsito de equipamentos de grande porte em função do processo de construção.

Dessa forma, uma área após atividade de mineração que apresenta a necessidade de ser recuperada tem como desafio a formulação de um tecnossolo capaz de atender condições para garantir o estabelecimento e o desenvolvimento da vegetação, pois a camada superficial do solo é removida e o substrato mineral que fica exposto muitas vezes não oferece estas condições (BIZUTI et al., 2022). Uma das técnicas usadas para

melhorar as condições do tecnossolo e garantir o estabelecimento da cobertura vegetal em áreas de mineração a serem recuperadas é o emprego de um *topsoil* como fonte de matéria orgânica, nutrientes, propágulos e microrganismos (GRIFFITH, 2005; SKRINDO & PEDERSEN, 2004), mas nem sempre esse material apresenta boa qualidade devido ao excesso de movimentação e revolvimento (FERREIRA et al., 2015), ou está indisponível, ou ainda carece de fonte de propágulos, dificultando os modelos de sucessão ecológica (OLIVEIRA et al., 2021), o que implica em atrasos ou impossibilita a restauração florestal em algumas áreas de mineração (SKOUSEN, 2014). Diante das frequentes dificuldades relacionadas à disponibilidade de um *topsoil* de qualidade, se faz necessário o aprofundamento dos estudos na busca de alternativas que possibilitem a melhoria das condições do substrato para o restabelecimento vegetal, ou até mesmo sua substituição (ARTICO, 2018).

Na região da área de estudo os Latossolos Amarelos Distróficos dominam a paisagem. Estes solos são identificados por apresentarem horizonte B latossólico abaixo do horizonte A e, de forma geral, são caracterizados como solos profundos, bem drenados e de baixa fertilidade natural (SANTOS., 2018). De fato, Souza (2018) registra baixa fertilidade natural em todo um perfil de Latossolo Amarelo Distrófico no platô Miltônia III onde é realizada a lavra da bauxita, sendo que os valores de CTC e matéria orgânica foram $11,3 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e $2,5 \%$ no horizonte A1, respectivamente e $3,37 \text{ cmolc dm}^{-3}$ a $0,3 \%$ no horizonte B3 (118 - 200 cm), respectivamente. A fertilidade foi ainda mais baixa em solos construído na mineração por ela estudada, nos quais a autora registra valores semelhantes e até menores aos citados para o B3, já na primeira camada de estéril, logo abaixo da camada de *topsoil*, ocorrendo entre cerca de 05 a 20 cm de profundidade. Esses substratos não são capazes de repor a M.O, nutrientes, banco de sementes e biomassa que foram removidos devido à lavra do minério. Ressalta-se que estes atributos estão ligados diretamente com a saúde do solo (capacidade produtiva), além da alta redução da biodiversidade local, havendo a necessidade de uma intervenção (GUIMARÃES et al., 2022).

Novais et al. (2007), retratam que os Latossolos argilosos são naturalmente ácidos, com baixa fertilidade disponível para o restabelecimento da vegetação e é comum a prática de técnicas para corrigir a acidez e equilibrar a fertilidade do solo, sendo que ambas têm a finalidade de disponibilizar nutrientes de forma adequada, para o desenvolvimento da vegetação. Outros fatores que contribuem para a melhoria das condições do meio e que podem influenciar no

processo de recuperação ambiental são a qualidade, a quantidade e o aporte de matéria orgânica no solo. Souza (2018) confirma que os solos construídos na mesma mina apresentaram baixa fertilidade natural e muitos apresentaram caráter ácido. O caráter ácido também acentua ainda mais a expressão de baixos valores de bases trocáveis, que já são naturalmente baixos nos solos da região amazônica, como apontam Rodrigues et al., (2003).

Neste sentido, Furtini et al. (2001) explicam que a matéria orgânica do solo, devido a sua elevada densidade de cargas negativas, é a principal responsável pela CTC em solos brasileiros. No entanto, no caso de solos construídos é comum encontrarmos teores de MOS abaixo de 1% devido à mistura dos materiais provenientes de diferentes horizontes (CORRÊA, 2009). Como, em relação a um solo natural sob florestas, os solos construídos apresentam valores mais baixos de MOS (COSTA e ZOCHE, 2009), a incorporação de material orgânico ao material estéril, pode ser uma alternativa bastante promissora para recuperação de áreas de mineração, uma vez que a M.O. é essencial para o desenvolvimento da vegetação e da microbiota do solo (MENDES FILHO, 2004).

3.4 Contribuição da matéria orgânica para formulação do tecnossolo

A matéria orgânica (MO) exerce uma função primordial, resultado na manutenção da qualidade do solo, sendo ainda mais necessária nas áreas degradadas e a sua perda causa sérios problemas à estrutura do solo. A incorporação de materiais orgânicos no solo tem ações de melhorias nas características físico-químicas e a ação cimentante da MO proporciona melhorias na estrutura do solo e aumenta a capacidade de retenção de água e nutrientes (MATOS, 2014; SÁNCHEZ, 2015).

Akala e Lal (2000) dizem que a matéria orgânica desempenha uma função importante no aumento das funções químicas, físicas e biológicas do solo, afetando quase todos os atributos, tendo influência na formação de novo horizonte de superfície, portanto, a qualidade e quantidade da M.O determinam se a recuperação do solo foi bem-sucedida, contribuindo também para o aumento da fertilidade e biodiversidade do solo (FINATTO et al., 2013) e para o restabelecimento da vegetação, com reflexo na estabilidade do ecossistema (COSTA et al., 2013).

A matéria orgânica é então fundamental para melhoria das propriedades químicas e biológicas do solo (PASCUAL et al. 1999; STEWART et al. 2000). Canellas et. al.,

(2003) acrescentam que a CTC é um dos processos químicos mais importantes para manutenção da fertilidade do solo e mesmo em pequenas proporções em relação à massa total do solo. Dessa forma, a M.O. chega a contribuir com 20 – 90 % da CTC das camadas superficiais.

Cambardella et. al., (1992) e Cunha et. al., (2015) ressaltam que a matéria orgânica estabelece ligação com diversos componentes do solo, ela influencia diretamente na retenção de água, formação de agregados, densidade do solo, pH, capacidade tampão, capacidade de troca catiônica - CTC, na mineralização, sorção de metais pesados, infiltração de água no solo, aeração e atividade microbianas, sendo um dos indicadores úteis para avaliação da qualidade do solo, dado o fato da M.O apresentar-se como um sistema complexo de substâncias, onde sua dinâmica é liderada pelo acréscimo de resíduos orgânicos de naturezas distintas e transformações contínuas sob fatores químicos, físicos e biológicos.

O estado de agregação pode ser considerado como um possível parâmetro a ser utilizado para medir a qualidade do solo, pois altos níveis de agregação mostram boa estrutura do solo e boa influência no crescimento das plantas (GRIFFITH et al. 1986 e NEVES et al. 2006). Dessa forma, a matéria orgânica em combinação com os cátions adequados colabora na formação dos agregados, atuando como agentes cimentantes (Six et al., 2004). Bayer et. al., (2008) ressaltam que o fenômeno de agregação é resultante da reorganização das partículas de argila do solo, sendo a M.O. um dos fatores determinantes na estabilidade dos agregados, devido às ligações químicas entre os compostos de matéria orgânica e partículas minerais. Cunha et. al., (2015) ressaltam a importância da M.O. em solos com predomínio de cargas positivas, nestes a matéria orgânica exerce um papel fundamental de agente ligante. Por sua vez, os resíduos de alimentos podem ser uma alternativa de incremento da M.O. no solo, servindo como adubos orgânicos, para aumentar as populações microbianas que auxiliam o crescimento da vegetação (CHITRAVADIVU- et al., 2009). Portanto pode-se considerar os restos de alimentos como um insumo potencial que, se bem manejado, beneficia as propriedades dos solos, como por exemplo, o suprimento de nitrogênio para as plantas (RYAN et al., 1973; PARKER & SOMMERS, 1983; BARBARICK & IPPOLITO, 2000). No entanto, para que esses resíduos orgânicos sejam incrementados ao solo, é necessário passarem por tratamentos e um dos possíveis processos é de compostagem, que seria um método

menos oneroso e eficaz na redução da quantidade de material a ser disposto em aterros (BARREIRA ET AL., 2008; TROSCHINETZ E MIHELICIC, 2009). Provenzano (2001) descreve que a compostagem pode ser considerada a aceleração do processo natural, que transforma a M.O. em solo, em ambientes favoráveis (temperatura, umidade, pH e aeração) para a atividade microbiana. Fialho (2010), diz que o processo de decomposição biológica vai variar da degradação dos compostos de carbono presentes no material (carboidratos, aminoácidos, ácidos graxos, celulose, lignina e etc), bem como seu conteúdo de nutrientes.

Holtz et al., (2004) notaram que a adição de cavaco de madeira no solo promoveu a redução do pH e aumento do teor de C e M.O. e potencializou a infiltração de água no solo. Isso significa que a incorporação de cavacos de madeiras teve a ação de melhorar as propriedades químicas e físicas do solo.

Silva & Mendonça (2007) abordam outro estágio da matéria orgânica, à fração lábil, que se destaca por apresentar alta taxa de decomposição em período curto e permanecendo ao solo, contribuindo fortemente para disponibilização de nutrientes, além do fornecimento de C aos microrganismos.

3.5 Ações para a recuperação ambiental

As ações de recuperação quando bem-sucedidas durante e após as atividades da mineração, mesmo em condições de estrutura diferente de uma floresta nativa (STANDISH et al., 2021), podem fornecer um ambiente ecologicamente capaz de compensar as perdas momentâneas dos habitats de animais e assim a recolonização da área, aumentando a riqueza e a diversidade dos componentes da fauna e flora ao longo dos anos (MOIR et al., 2005). Desse modo, as áreas alteradas pela atividade de mineração devem ser recuperadas, visando prioritariamente o retorno das funções e serviços ecossistêmicos o mais próximo possível do original (SER, 2004).

Como práticas de recuperações das áreas alteradas pela atividade de mineração a céu aberto em terrenos planos, as alternativas e técnicas mais utilizadas são: Plantio Direto com Espécies Arbóreas Nativas e a Regeneração Natural (SALOMÃO et al. 2007; MARTINS et al. 2020; ROJAS-BOTERO et al. 2020). Para ambas as metodologias é necessária a existência de um solo que proporcione condições para o restabelecimento e desenvolvimento da vegetação. Asensio et. al., (2019) afirmam que há situações em que

o tecnossolo é criado por combinações de diferentes materiais, com objetivo de sanar passivos ambientais (área degradada) nesse caso, propiciando condições para o restabelecimento da vegetação.

3.6 Espécies vegetais como condicionadoras do tecnossolo

Especialmente o feijão guandu é destacado na literatura por apresentar bom desempenho na produção de biomassa, aumento da capacidade de troca de cátions do solo devido ao acréscimo de M.O e adaptação a solos com baixa fertilidade (ANDRADE et al., 2022). Conceição et al. (2014) notaram em solo com rotação de culturas mais espécies de gramíneas e leguminosas, uma maior labilidade de M.O. quando comparado com solos plantados da forma convencional. A maior quantidade de resíduo e proteção do solo no sistema com incremento de gramíneas e leguminosas aumentaram a quantidade e labilidade da MO.

O *Cajanus cajan* é uma espécie pertencente à família das leguminosas bastante utilizadas em solos com baixa disponibilidade de nutriente, como os pós lavra do minério, servindo como adubo verde, pois o potencial produtivo é 6,5 a 9,5 t ha⁻¹ de massa seca na parte aérea, tem porte arbustivo ereto, de altura alternando em 2 a 3 m e um ciclo de vida de 3 a 4 anos, apresenta de crescimento rápido, cobrindo o solo e aumentando a biomassa no estágio inicial (BELTRAME E RODRIGUES, 2007). Atuando nos atributos do solo, como na química com o enriquecimento, o *Cajanus cajan* têm a capacidade de capturar o nitrogênio do ar e incorporara-lo no solo (NOGUEIRA et al., 2012; MELO et al., 2013). Calegari (2016) descreve que o *Cajanus cajan* é uma espécie arbustiva referência quando o assunto é solo, pois apresenta eficiência na produção de biomassa com baixa relação C/N, sendo utilizada como adubo verde, devido a seu alto potencial de nodulação e fixação de N da atmosfera no solo, além de atuar no processo de ciclagem de nutriente. Esta planta possui um sistema radicular vigoroso, quando profundo e bem desenvolvido, pode atuar como “subsolador biológico” em profundidade, rompendo as camadas do solo com certo nível de compactação.

Lima (2004), relata que as arbustivas como o *Cajanus cajan* têm rápido crescimento cobrindo o solo de uma forma mais rápida, atuando assim como agente de proteção contra as gotas de chuvas e o controle inicial de processo erosivo. Além do potencial de acelerar a atividade biológica, devido à produção de matéria orgânica no

solo, melhorando os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (SILVA et al. 2018). Scivittaro et al. (2004) reiteram que as leguminosas aceleram o processo de ciclagem de nutrientes, realizam adição de matéria orgânica e fixação de nitrogênio e, a depender da espécie, inibem propagação de espécies daninhas, além de promoverem a cobertura do solo e atuarem como alternativa orgânica à utilização de fertilizantes minerais.

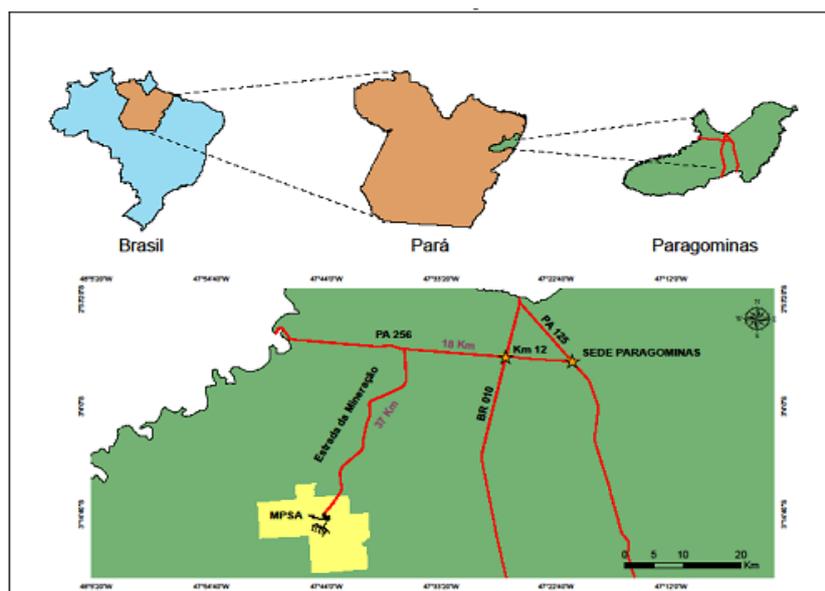
Farias et al., (2013) ressaltam que o feijão guandu se destaca pelo sistema radicular profundos, com potencial de se desenvolver em solos com tendência de formações de crostas superficiais, além apresentar alto potencial na absorção de água resistindo por um período maior ao déficit hídrico e possibilidade de reciclagem de nutrientes. Esta planta possui porte arbustivo e crescimento rápido, coloniza a área e promove o estabelecimento de *safe sites* com a rápida cobertura do solo, aumentando a biomassa inicial do sistema (URBANSKA et al., 2004). As leguminosas têm um potencial de reestruturar o solo, com a descompactação das camadas superiores dos solos, devido ao sistema radicular agressivo (COSTA et al., 2003). Chen & Weil, (2011) descrevem que algumas espécies pertencentes à família das leguminosas possuem raízes com diâmetro maior em comparação com outras famílias, essa característica facilita a penetração no solo. Além disso estas plantas auxiliam na criação de poros que facilitam o crescimento das raízes subsequentes (COLOMBI et al., 2017).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A área do projeto está localizada na jazida de bauxita pertencente ao grupo norueguês Norsk Hydro (3° 15' 38"S e 47° 43' 28" W) a 70 km da sede do município de Paragominas (2° 59' 42" S e 47° 21' 10" O), Região Nordeste do Estado do Pará, que por sua vez fica a uma distante 350 km da capital paraense, Belém (IBGE, 2022) (Figura 1). O clima da região é do tipo "Aw", conforme a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado como quente e úmido com estações de chuva e de seca bem definidos. A temperatura média anual é de 26,3° C e com umidade relativa do ar em torno de 81% na média anual (BASTOS et al., 2006).

Figura 1 – Localização do município de Paragominas.

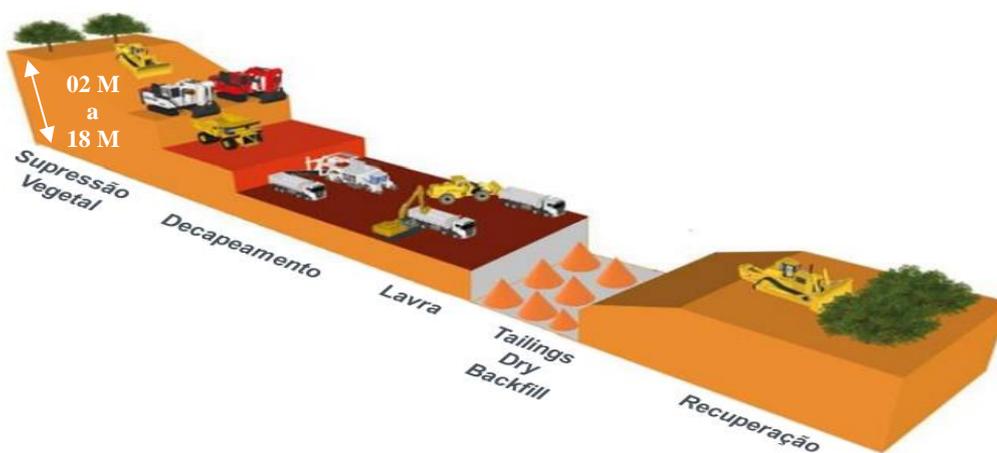


Fonte: Autor, 2022.

O grupo Norsk Hydro (2022) descreve a importância do Município de Paragominas, como uma parte estratégica para a cadeia de produção do alumínio, pois nela se localiza o depósito do minério que é a matéria prima, denominado Mineração Paragominas S.A. As operações tiveram início em 2007 e atualmente movimentam cerca de 16 milhões de toneladas de minério por ano, produzindo anualmente 11,4 milhões de toneladas de bauxita, que é transportada por um mineroduto de 244 quilômetros até a cidade de Barcarena, o primeiro do mundo a transportar esse tipo de minério.

O método utilizado para a extração da bauxita é o *strip mining method* (mineração em tiras ou faixas). O processo inicia com a atividade de supressão vegetal do depósito de bauxita e logo após acontece o transporte do *topsoil* (horizonte A e, eventualmente, parte dos horizontes subsequentes do antigo solo original) para áreas a serem recuperadas, remoção do estéril (horizontes B e C) nas profundidades entre 2 m a 18 m, para então ser realizada a lavra do minério (média de 2m de bauxita), sendo este processo realizado a céu aberto. Posterior à extração da bauxita, o terreno é reconformado e nivelado com estéril e, no processo normal de construção do solo, sobre sua superfície é espalhado uma camada de cerca de 30 cm de *topsoil* proveniente da área de supressão vegetal conforme Figura 2.

Figura 2 - Ilustração do processo de lavra da bauxita.



Fonte: Relatório geral das atividades de avanço de Lavra, 2021³.

O trabalho foi conduzido em área sob processo de recuperação ambiental pós mineração de bauxita. O substrato mineral denominado estéril apresenta baixa disponibilidades de nutrientes e M.O., conforme análises realizadas nas seguintes profundidades de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm, conforme sugerido pelo Manual de método de análise de solo (EMBRAPA, 2017), valores apresentaram (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização dos atributos químicos do estéril

Prof. (cm)	M.O	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m
	g kg ⁻¹		----- cmolc/dm ³ -----								----	----
0-20	1.2	4.5	0.5	0.2	0,03	0,1	2,1	0.7	0.83	0,93	78	12
20-40	1.0	4.8	0.3	0.2	0.03	0,1	2,0	0.5	0.63	0,73	73	19

³ Relatório interno da Mineração Paragominas S.A., não disponível.

Tabela 2 – Caracterização dos atributos químicos dos resíduos – Resíduo Desidratado do Refeitório.

DETERMINAÇÕES	RESULTADOS	
	BASE SECA (65 °C)	BASE ÚMIDA
Resíduo Desidratado do Refeitório		
pH (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹)	-	6,7
Densidade	-	0,62 g/cm ³
Umidade 65°C	-	0,1141%
Umidade 110°C	-	0,029%
Umidade Total	-	0,1431%
Matéria Orgânica (MO)	0,7056%	0,6251%
Carbono Orgânico (Corg)	0,392%	0,3473%
Resíduo Mineral Total (RMT)	0,2701%	0,2393%
Resíduo Mineral (RM)	0,2345%	0,2077%
Resíduo Mineral Insolúvel (RMI)	0,0357%	0,0316%
Nitrogênio (N) Total	0,0585%	0,0518%
Fósforo (P₂O₅) Total	0,0314%	0,0278%
Potássio (K₂O) Total	0,0059%	0,0052%
Cálcio (Ca) Total	0,0701%	0,0621%
Magnésio (Mg) Total	0,0012%	0,0011%
Enxofre (S) Total	0,0024	0,0021%
Relação C/N	-	7
Cobre (Cu) Total	0,00001%	0,00001%
Ferro (Fe) Total	0,0077%	0,00682%
Manganês (Mn) Total	0,00005%	0,00004%
Zinco (Zn) Total	0,0002%	0,00018%
Boro (B) Total	<0,001 %	<0,001 %
Sódio (Na) Total	0,01185%	0,0105%

Resíduo Madeira em Decomposição		
pH (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹)	-	4,5
Densidade	-	0,38 g/cm ³
Umidade 65°C	-	0,0741%
Umidade 110°C	-	0,0228%
Umidade Total	-	0,0969%
Matéria Orgânica (MO)	0,5587%	0,5173%
Carbono Orgânico (Corg)	0,3104%	0,2874%
Resíduo Mineral Total (RMT)	0,4193%	0,3882%
Resíduo Mineral (RM)	0,2345%	0,2171%
Resíduo Mineral Insolúvel (RMI)	0,1848%	0,1711%
Nitrogênio (N) Total	0,0099%	0,0092%
Fósforo (P₂O₅) Total	0,0012%	0,0011%
Potássio (K₂O) Total	0,0003%	0,0003%
Cálcio (Ca) Total	0,0082%	0,0076%
Magnésio (Mg) Total	0,0005%	0,0005%
Enxofre (S) Total	0,0005%	0,0005%
Relação C/N	-	31
Cobre (Cu) Total	0,00001%	0,00001%
Ferro (Fe) Total	0,03708%	0,03433%
Manganês (Mn) Total	0,00019%	0,00018%
Zinco (Zn) Total	0,00014%	0,00013%
Boro (B) Total	<0,001 %	<0,001 %
Sódio (Na) Total	0,00055%	0,00051%

4.2 Histórico da Área

A área selecionada para o experimento é formada a partir do estéril pós lavra de bauxita, onde ele foi espalhado para preenchimento da cava e conformação do terreno visando atingir uma condição topográfica próxima à encontrada na região de terreno plano conforme Figura 3. O Quadro 1 traz o histórico das operações realizadas para a implantação do experimento e as informações relacionadas.

Quadro 1 – Histórico e descrição e das atividades do projeto.

Data	Mês	Atividades	Descrição
08/11/2021	-4	Preparo do terreno	Foi realizado com a lâmina frontal do trator esteira (D6), o equipamento aprofunda o implemento até atingir 1 m. Posterior a essa etapa, o material é devolvido para o local e se inicia a escarificação com escarificador de três dentes e com uma haste de 70 cm (Figura 3).
20/12/2021	-3	Incorporação de M.O e Calcário	Os resíduos orgânicos de cada fonte foram distribuídos nas seguintes dosagens: 10, 20 e 40 t _{ha} ⁻¹ de resíduos de refeitório e 10, 20 e 40 t _{ha} ⁻¹ de madeira em decomposição. O calcário foi aplicado em área total conforme a NC: 0,0534 t, Figuras 5.
14/02/2022	0	Semeadura do guandu	O <i>Cajanus cajan</i> foi semeado em metro linear com o espaçamento de 5cm, Figura 6
21/02/2022	0	Fertilização	A adubação foi aplicada nas seguintes dosagens N = 20 kg ha ⁻¹ ; P ₂ O ₅ = 80 kg/ha; e K = 90 kg/ha ⁻¹ , Figura 7

Figura 3 – Atividade de descompactação do solo com escarificador.

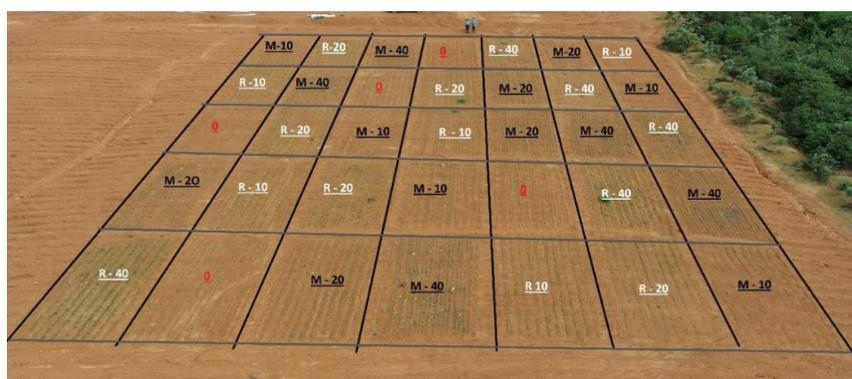


Fonte: autor, 2022.

O experimento foi conduzido em blocos casualizados com sete tratamentos aplicados em parcelas de 05 m x 10 m, em cinco repetições por tratamento, totalizando

35 parcelas. Os tratamentos consistiram na mescla de resíduos orgânicos presentes na própria mina. Estes resíduos foram aplicados sob as seguintes fontes e dosagens: Fonte 01 - resíduo de madeira (M) - resíduos de madeira proveniente da supressão vegetal em estágio avançado de decomposição em dosagens de 10, 20 e 40 t ha⁻¹; Fonte 02 - resíduo de refeitório (R) - resíduo orgânico desidratado provenientes dos refeitórios da mineração em dosagens de 10, 20 e 40 t ha⁻¹ e; por fim; o tratamento testemunha sem aplicação de matéria orgânica (TT), conforme a representação na Figura 4.

Figura 4 – Visão aérea da distribuição das parcelas em campo



Fonte: autor, 2022.

O Quadro 2 sumariza a designação dos tratamentos neste experimento. Os resíduos orgânicos correspondentes a cada fonte e dose foram incorporados ao estéril de forma manual, a cerca de 10 cm de profundidade, com enxada. Como cobertura vegetal e planta indicadora foi empregado o *Cajanus cajan* (feijão guandu var. Super N), pois além de cobrir o solo, tem a vantagem de fixação de N ao sistema. As Figuras 5, 6 e 7 ilustram as ações e aplicação e incorporação do calcário e os resíduos orgânicos, semeadura e adubação na área experimental.

Quadro 2 – Tratamentos executados na área experimental.

Tratamento	Tratamento no solo
TT	Estéril sem adição de fontes orgânica
M10	10 t/ha de madeira em decomposição
M20	20 t/ha de madeira em decomposição
M40	40 t/ha de madeira em decomposição
R10	10 t/ha de resíduo orgânico de refeitório
R20	20 t/ha de resíduo orgânico de refeitório
R40	40 t/ha de resíduo orgânico de refeitório

Figura 5 – Aplicação e incorporação de calcário e resíduos orgânicos na área de estudo.



Fonte: autor, 2022.

Figura 6 – Semeadura do guandu na área experimental.



Fonte: autor, 2022.

Figura 7 – Aplicação do adubo químico na área experimental



Fonte: autor, 2022.

4.3 Amostragens de solo e do material vegetal

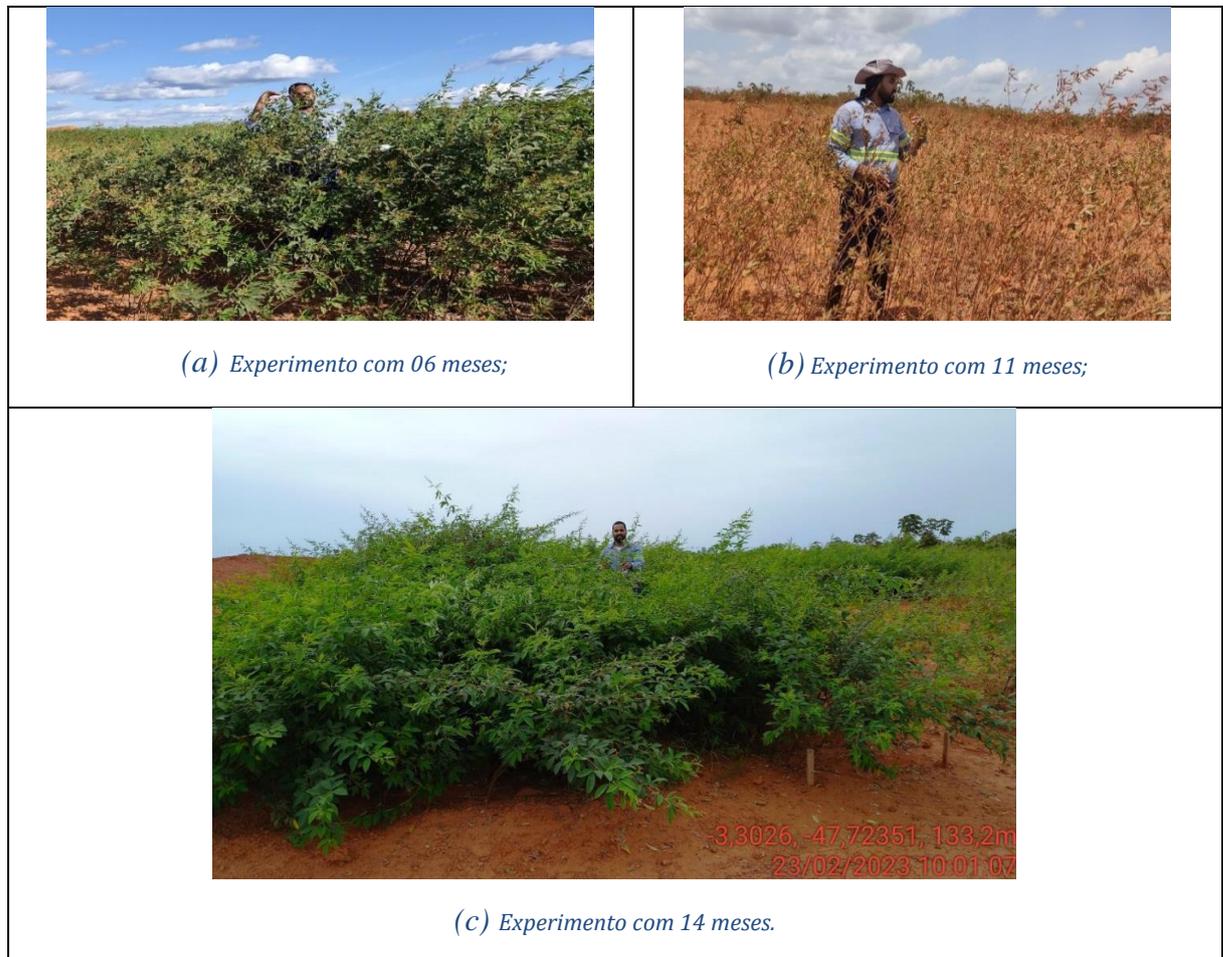
Em cada parcela o solo foi coletado às profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20 - 40 cm. Para amostragem do solo destinada à avaliação dos atributos químicos, as coletas foram realizadas em mini trincheiras em três pontos por profundidade distribuídos ao acaso dentro de cada parcela. Posteriormente o material coletado foi misturado em um balde para a formação de uma amostra composta por profundidade e parcela, totalizando 140 amostras compostas para cada época de amostragem. As análises químicas foram realizadas aos 6 e 14 meses após a instalação do experimento.

A amostragem de solo indeformado destinado às análises de densidade do solo e porosidade total também foram coletadas em três pontos por parcela em mini-trincheiras e foram realizadas aos 14 meses após a instalação do experimento. Para esta amostragem foram utilizados anéis volumétricos de aço de cerca de 100 cm³ e trado castelinho. Amostragem para biomassa aérea e estimativa da altura da planta indicadora

No início da floração, com 6 meses de experimento, foi realizada a medição da altura e coleta da parte aérea do feijão guandu (Figura 8). O corte foi realizado a 5 cm do solo onde foi mensurado a altura dos indivíduos cortados por tratamento e o material vegetativo acamado na parcela. Para quantificação da biomassa foram coletadas as plantas em 3 subparcelas dentro de cada parcela do experimento com as dimensões de 1m

x 1m x 1m x 1m, totalizando um metro quadrado (Figura 9a). As amostras do material vegetal foram acondicionadas em sacos de papel (Figura 9b) e transportadas para o laboratório da Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, onde foi obtida biomassa seca em estufa a 65°C.

Figura 8 – Floração do feijão guandu



Fonte: autor, 2022.

A matéria fresca foi determinada a partir da pesagem da biomassa verde obtida do projeto, utilizando-se de balança de precisão 0,01 g; logo após, o material foi picado e colocado em saco de papel para secagem em estufa de circulação forçada de ar (65°C) até atingir massa constante com vista à determinação da matéria seca.

Figura 9 – Coleta de biomassa do guandu no experimento.



4.4 Análise de solo

As amostras foram encaminhadas para a Área de Ciência do Solo da Universidade Federal Rural da Amazônia UFRA, para receberem os devidos tratamentos: secagem ao ar até peso constante, destorroamento e passagem em peneiras de malha 2 mm, para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA).

4.4.1.1 Análises Química

Para a caracterização dos atributos químicos da TFSA de todas as camadas foram determinados o pH em água, o fósforo disponível, os cátions básicos trocáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^{+}), a acidez potencial (H^{+} + Al^{+3}), matéria orgânica foram analisados conforme Embrapa (2017).

A partir da obtenção dos valores dos cátions trocáveis foram calculadas: soma de bases (SB) = $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$; capacidade de troca de cátions (CTC) = $\text{SB} + (\text{H} + \text{Al}^{3+})$; saturação por bases ($\text{V}\%$) = $(\text{SB} / \text{CTC}) * 100$ e saturação por alumínio ($\text{m}\%$) = $(\text{Al}^{3+} / \text{CTC}_E) * 100$ (EMBRAPA, 2017).

Figura 10 – Análise química do solo no laboratório de fertilidades de solo da UFRA.



Fonte: autor, 2022.

4.4.1.2 Análises Físicas

As amostragens para as análises de densidade e porosidade do solo e estabilidade de agregados em água foram realizadas no final do período experimental, no 14º mês de condução.

4.4.1.2.1 Densidade e porosidade total do solo

As variáveis de densidade do solo (D_s) foram obtidas a partir das coletas de amostras indeformadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e de 20-40 cm. Como ferramenta de coleta foi utilizado um anel volumétrico medindo 50 cm^3 e altura de 0,5 cm, a coleta das amostras foi feita cuidadosamente a fim de evitar a compactação do solo no interior do anel. Posteriormente à coleta de campo, as amostras foram transportadas para a Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA e colocadas para secarem em estufa à 105°C por 48 horas e a densidade foi obtida utilizando-se a equação:

Equação de densidade do solo.

$$D_s = \frac{m_a}{V}$$

Em que:

- D_s – densidade do solo, em kg dm^{-3} (equivalente a g cm^{-3});

- m_a – massa da amostra de solo seco a 105 °C até peso constante, em g;
- V – volume do cilindro, em cm^3 .

A porosidade total (P_t) foi calculada após a determinação de densidade do solo e densidade da partícula (EMBRAPA, 2017). Foi utilizado a equação:

Equação de porosidade total.

$$P_t = \frac{(D_p - D_s)}{D_p}$$

Em que:

- P_t – porosidade total, em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$;
- D_p – densidade de partículas sólidas do solo, em kg dm^{-3} , considerada igual a 2,65.
- D_s – densidade do solo, em kg dm^{-3} .

4.4.2 Análise estatística

Os dados foram primeiramente submetidos ao teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk); para os conjuntos de dados que não atingiram a normalidade foi realizado a transformação Box Cox e após isso, a análise de variância (ANOVA) e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Densidade e porosidade total do solo

Os dados de densidade (D_s) e porosidade total (P_t) do Tecnosolo não se diferenciaram, respectivamente, entre os tratamentos em todas as profundidades, apresentando uma variação entre 1,1 a 1,4 g/cm^3 (Tabela 2) para os valores de densidade do solo e 49,0 a 58,5 % para P_t . BARROS et al. (2013) encontraram valores de densidade (D_s) em solos construídos pós lavra de bauxita na região do planalto de Poços de Caldas, MG, Brasil, que se aproximam (1,33 g/cm^3) aos descritos nesse trabalho. Em estudo de perfis de solo, Souza (2018) obteve valores mais baixos (0,9 – 1,08 – 1,09 – 1,1 g/cm^3 nas respectivas profundidades de 0-5, 5-7, 7-17 e 17-34 cm), em perfil de solo na área de floresta nativa em região próxima de onde experimento foi instalado. No mesmo trabalho a autora encontrou evidências de compactação em alguns perfis de solos construídos pós lavra de bauxita, evidenciados por valores elevados de D_s (1,53 g/cm^3 a 1,65 g/cm^3) e

atribuiu esse fato ao preparo do terreno no período chuvoso e à pulverização de agregados na superfície do solo expostos. Uma das causas que justifica os valores de Ds atuais no presente estudo pode ser a recente atividade de preparo do terreno com revolvimento do solo até 1 m de profundidade e escarificação, empregando-se trator esteira no período de transição do verão para o inverno (Quadro 1), logo após foi incorporação do calcário e material orgânico – M.O., de forma manual, realizados no 1º mês de experimento (Quadro 1). Entretanto, o efeito da escarificação por si só pode não perpetuar, pois as partículas tendem a se acomodar com o tempo, sob sucessivos ciclos de umedecimento-secagem, resultando em processo de compactação (ABREU et al., 2004), o que pode ocasionar prejuízos à qualidade física do solo, entre elas, resistência mecânica à penetração, redução da macroporosidade, a taxa de infiltração de água e as trocas gasosas no solo, oportunizando a susceptibilidade à erosão hídrica (LANZANOVA et al., 2010). Por outro lado, o guandu pode mitigar ou mesmo evitar este quadro de degradação física pois, através da ação de seu sistema radicular, pode atuar como um descompactador biológico, diminuindo a Ds do tecnossolo durante o passar dos anos como apontado por Abreu et al., (2004) e TOLEDO et. al.(2008) em áreas agrícolas.

Embora os valores de Ds encontrados neste estudo não sejam considerados críticos para o desenvolvimento de raízes do feijão guandu ($DS > 1,85 \text{ g/cm}^{-3}$) de acordo com Reinert et al. 2003, é importante o acompanhamento desta variável no tempo para a obtenção de respostas mais precisas que possam dar embasamento para as tomadas de decisão na condução de sistemas futuros de recuperação das áreas mineradas.

Tabela 3 – Resultados de densidade e porosidade total do solo.

Tratamento	Densidade				Porosidade			
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	-----g/cm ³ -----				----- (%)-----			
TT	1,1 ^a	1,2 ^a	1,2 ^a	1,3 ^a	57,8 ^a	54,8 ^a	52,9 ^a	51,4 ^a
R10	1,2 ^a	1,2 ^a	1,2 ^a	1,3 ^a	55,8 ^a	54,2 ^a	53,2 ^a	52,3 ^a
R20	1,2 ^a	1,0 ^a	1,2 ^a	1,3 ^a	56,2 ^a	62,4 ^a	54,8 ^a	50,3 ^a
R40	1,1 ^a	1,2 ^a	1,1 ^a	1,3 ^a	58,5 ^a	54,7 ^a	57,7 ^a	51,2 ^a
M10	1,1 ^a	1,2 ^a	1,3 ^a	1,3 ^a	59,4 ^a	54,6 ^a	52,5 ^a	51,8 ^a
M20	1,1 ^a	1,2 ^a	1,3 ^a	1,2 ^a	57,6 ^a	55,3 ^a	52,5 ^a	55,6 ^a
M40	1,1 ^a	1,2 ^a	1,2 ^a	1,4 ^a	58,5 ^a	56,1 ^a	55,0 ^a	49,0 ^a

Para mesma variável, média seguida de mesma letra não diferem significativamente entre no teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.2 Fertilidade do solo

Com relação aos atributos químicos do solo, a incorporação dos compostos orgânicos ao estéril proporcionou efeitos mais perceptíveis apenas na camada 0-5 cm e somente para as variáveis carbono orgânico do solo (COS) e CTC potencial (CTC). Para COS nesta camada, aos 6 meses de condução do experimento, os tratamentos M40 e R40, com valores de 7,5 e 7,6 g kg⁻¹, respectivamente, se diferenciaram do TT, com 1,7 g kg⁻¹ e, aos 14 meses, os tratamentos M40 e R40, com 7,9 e 5,6 g kg⁻¹, respectivamente, se diferenciaram de TT e R10, com 2 e 1,5 g kg⁻¹, respectivamente. Dessa forma, as maiores doses de resíduos orgânicos garantiram aumento do conteúdo de COS no solo na camada 0-5 cm até o último período amostral. Para a CTC, M40 se diferenciou de TT apenas aos sete meses, com valores modestos de 3,06 e 1,64 cmolc kg⁻³, respectivamente, não havendo diferenças significativas entre os outros tratamentos de incorporação de compostos orgânicos com relação ao TT na camada superficial no primeiro período amostral, nem entre TT e os tratamentos no segundo período amostral e tão pouco nas camadas inferiores a 5 cm (Tabela 3).

O aumento de conteúdo de COS observado nos tratamentos das doses mais altas em curto espaço de tempo, se dá pela adição do fertilizante mineral mesclado com resíduos orgânicos (semelhando ao experimento exposto nesse trabalho). Corroborando com Rosset et. al., (2019), que em curto espaço de tempo (menos de um ano) obtiveram em seu experimento uma diferença de 74,73% no conteúdo de carbono orgânico total (COT) com fertilizante mineral e fontes de M.O (esterco bovino e cama de frango). Oliveira et. al., (2019), tiveram resultado semelhantes, com o aumento do COT, variando com a dosagem de aplicação dos fertilizantes minerais e orgânicos, apresentaram maiores teores de COT na camada de 0-5 cm de profundidade. Vários outros fatores podem influenciar nos teores de carbono orgânico total no solo, como a quantidade de fitomassa adicionada pela vegetação, a relação C/N, entre outros, podem vir alterar a taxa de decomposição da M.O. (GUARESCHI et al., 2018).

Os resultados reiteram a relevância da M.O. para o aumento da CTC no solo de mina de bauxita (SOUZA.,2018), pois em solos com predomínio de argilas oxídicas a matéria orgânica tem relação direta com a CTC como apontam Novais et al., (2011) e Brady; Weil, 2013). Devido sua elevada CTC, mesmo em pequenas quantidades, a

matéria orgânica evita que as cargas positivas desenvolvidas nos óxidos de Fe e Al supere as negativas (OLIVEIRA 2011).

Os valores do pH do tecnosolo variaram entre 4,90 e 5,50 nos dois períodos de coleta e profundidades, apresentando diferenças estatísticas apenas na profundidade de 0-5 cm e 20 a 40 cm aos 6 meses de condução experimental. No entanto os valores desta variável obtidos nos tratamentos se equivalem ao obtido em TT. Referente ao fósforo, apenas a camada 0-5 cm, aos 14 meses de condução do experimento apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos, em que R40 e R20, com valores de 24,2 e 24,1 mg dm⁻³, respectivamente, se diferenciaram estatísticas de M10 (0,8 mg dm⁻³). Contudo, tanto para 0-5 cm, quanto para as demais profundidades, os tratamentos não se diferenciaram de TT, o que indica que, em curto espaço de tempo, não há um efeito claro da aplicação de resíduos orgânicos sobre essas variáveis (Tabela 3). No caso do P, especificamente, foi encontrado um alto coeficiente de variação A variabilidade dos resultados observados, podem se dar em decorrência de vários fatores, como os teores deste elemento nos compostos utilizados (Quadro 1) e a forma de espalhamento e incorporação dos resíduos orgânicos, que foi realizada manualmente, com enxadas (Quadro 1- materiais e métodos). O'Connor (2021), em seu estudo, após 28 dias de incubação de solos e resíduos de alimentos desidratados, identificou que houve aumento do P disponível em solos argilosos em comparação com os arenosos. O mesmo autor diz que, em geral, o conteúdo com resíduos de alimentos desidratados aumentou o nível de P disponível. Segundo Yang et al., (2019), isso se deve provavelmente à saturação da capacidade de adsorção de P dos solos, levando a um aumento do fósforo na solução. Lythe et al., (2017) observaram aumento da disponibilidade de P com a adição de detritos de material lenhoso ao solo. Outra provável causa da variação é a aplicação do fertilizante fosfatado em superfície e sua reação com o solo, uma vez que Souza (2018) encontrou picos relevantes gibbsita $d = 4,85 \text{ \AA}$ - nas camadas de estéril de solos construídos na mina. Os solos oxídicos adsorvem o P aumentando as formas fortemente ligadas ao Al e Fe em relação a solos com mineralogia mais caulínica (MOREIRA et al., 2006 e PEREIRA et. al., 2020). Santos et al (2018) relatam maior adsorção de P no material em camadas subsuperficiais, correspondentes ao estéril, em relação à camada de topsoil, mais rica em matéria orgânica. A influência da matéria orgânica sobre o P-labil também é explanada por Kiehl, (1985); Rajj et al., (1987) e Corá et al., (2004). Outro fator que corrobora na

explicação da heterogeneidade dos valores de P a se considerar é a própria cobertura do solo, uma vez que está também foi heterogênea em algumas parcelas, principalmente quando se considera o potencial de absorção do nutriente pela planta (BARBER e NAVARRO, 1994) e os efeitos de seu sistema radicular na área. Os mesmos autores relatam que a decomposição das raízes do *Cajanus cajan* pode liberar mais de 80 kg ha⁻¹ de P. De acordo com Shibata e Yano (2003), as raízes desta planta excretam ácidos orgânicos como o ácido cítrico, piscídico e tartárico que ajudam a mobilizar o fósforo no solo.

Nas camadas inferiores a 5 cm, o único tratamento que se diferenciou de TT foi R10 para a saturação de alumínio (m) e para as demais variáveis os tratamentos de incorporação de resíduos orgânicos também não se distanciaram estatisticamente da testemunha. Desta forma, embora tenham sido observadas diferenças estatísticas nos valores de soma de bases (SB) no décimo quinto mês do experimento, nas camadas 5-10 cm e, a 20-40 cm e também no percentual de saturação por bases na camada de 20-40 cm na mesma época de coleta, as causas destas variações não são muito claras e, como aconteceu para o pH e P, podem não estar relacionadas ao efeito dos tratamentos de aplicação de resíduos orgânicos, uma vez que todos os valores obtidos para estas e demais variáveis nestes tratamentos são equivalentes aos obtidos no TT (Tabela 3).

Além disso, o tecnossolo é um substrato recém-construído, que ainda não passou por processos pedogênicos, como muitos solos jovens que são heterogênicos, esse fato pode influenciar na heterogeneidade nos teores dos atributos químicos, devido à instabilidade físico-química do solo (CAMPOS et al., 2003). Corroborando, Santos (2021), em trabalho em tecnossolo proveniente da barragem do Fundão de 2015 - MG, concluiu que após 6 anos o substrato vem passando por alterações físico/químico das suas propriedades. Segundo Monserie et al., (2009), isso demonstra que o substrato ainda não se encontra em equilíbrio. Em estudo na mesma mina de bauxita onde o experimento foi implementado, Souza (2018), concluí que áreas de solos construídos com 9 anos não responderam a fatores de evolução pedogenética a curto prazo para a maioria das variáveis na camada de 20-40 cm, portanto, a recuperação destes atributos em maiores profundidades demandará muito mais tempo.

Tabela 4 – Atributos químicos do tecnossolo avaliados aos 6 e 14 meses do experimento. (continua)

Tratamentos	pH		Corg		P		SB		CTC		V		m	
	-----H2O-----		-----g kg ⁻¹ -----		-----mg dm ⁻³ -----		-----cmolc dm ⁻³ -----				-----(%)-----			
Coleta	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses
0 – 05cm														
TT	5,24 ^{ab}	5,4 ^a	1,7 ^b	2,0 ^c	26,9 ^a	14,3 ^{ab}	0,76 ^a	0,9 ^a	1,64 ^b	2,61 ^{ab}	46,4 ^a	33,5 ^a	13,9 ^a	3,3 ^a
R10	5,12 ^{ab}	5,1 ^a	3,4 ^{ab}	1,5 ^c	22,0 ^a	10,9 ^{ab}	0,98 ^a	0,6 ^a	2,25 ^{ab}	2,5 ^{ab}	43,2 ^a	25,4 ^a	20,1 ^a	4,9 ^a
R20	5,20 ^{ab}	5,3 ^a	4,0 ^{ab}	3,5 ^{abc}	60,1 ^a	24,2 ^a	1,00 ^a	1,0 ^a	2,18 ^{ab}	2,9 ^{ab}	43,7 ^a	35,2 ^a	12,8 ^a	1,6 ^a
R40	4,95 ^b	5,4 ^a	7,6 ^a	5,6 ^{ab}	70,6 ^a	24,1 ^a	1,16 ^a	1,1 ^a	2,71 ^{ab}	3,2 ^{ab}	43,7 ^a	34,4 ^a	08,8 ^a	2,9 ^a
M10	5,37 ^a	5,2 ^a	4,3 ^{ab}	2,9 ^{bc}	11,6 ^a	00,8 ^b	0,93 ^a	0,6 ^a	2,01 ^{ab}	2,4 ^b	48,4 ^a	26,2 ^a	06,5 ^a	0,0 ^a
M20	4,26 ^{ab}	5,5 ^a	6,0 ^{ab}	3,5 ^{abc}	20,1 ^a	10,1 ^{ab}	0,93 ^a	0,8 ^a	2,50 ^{ab}	2,7 ^{ab}	38,4 ^a	30,3 ^a	10,1 ^a	4,3 ^a
M40	5,34 ^a	5,3 ^a	7,5 ^a	7,9 ^a	06,1 ^a	04,5 ^{ab}	1,10 ^a	1,1 ^a	3,06 ^a	3,4 ^a	35,5 ^a	31,1 ^a	13,9 ^a	3,2 ^a
05 – 10cm														
TT	5,35 ^a	5,1 ^a	3,2 ^a	1,4 ^a	04,5 ^a	0,8	0,5 ^a	0,4 ^{ab}	1,7 ^a	2,6 ^a	26,3 ^a	18,4 ^a	23,3 ^a	3,6 ^a
R10	5,24 ^a	4,9 ^a	2,1 ^a	0,8 ^a	09,3 ^a	0,2	0,5 ^a	0,4 ^{ab}	2,3 ^a	2,4 ^a	26,1 ^a	18,5 ^a	15,0 ^a	4,7 ^a
R20	5,12 ^a	5,2 ^a	2,6 ^a	1,6 ^a	18,7 ^a	4,4	0,7 ^a	0,5 ^{ab}	2,08 ^a	2,6 ^a	34,5 ^a	20,5 ^a	13,6 ^a	3,4 ^a
R40	5,26 ^a	5,2 ^a	3,5 ^a	2,9 ^a	04,5 ^a	6,5	0,6 ^a	0,7 ^a	1,8 ^a	3,0 ^a	34,5 ^a	22,9 ^a	13,0 ^a	3,0 ^a
M10	5,44 ^a	5,1 ^a	2,1 ^a	1,7 ^a	05,4 ^a	0,0	0,4 ^a	0,4 ^{ab}	1,8 ^a	2,2 ^a	21,4 ^a	19,3 ^a	17,0 ^a	3,5 ^a
M20	5,28 ^a	5,2 ^a	3,9 ^a	1,2 ^a	06,5 ^a	0,6	0,6 ^a	0,4 ^{ab}	2,2 ^a	2,7 ^a	28,3 ^a	17,0 ^a	17,0 ^a	14,2 ^a
M40	5,43 ^a	5,1 ^a	5,7 ^a	2,6 ^a	00,6 ^a	0,2	0,5 ^a	0,5 ^{ab}	2,4 ^a	3,0 ^a	19,5 ^a	18,6 ^a	22,5 ^a	2,9 ^a

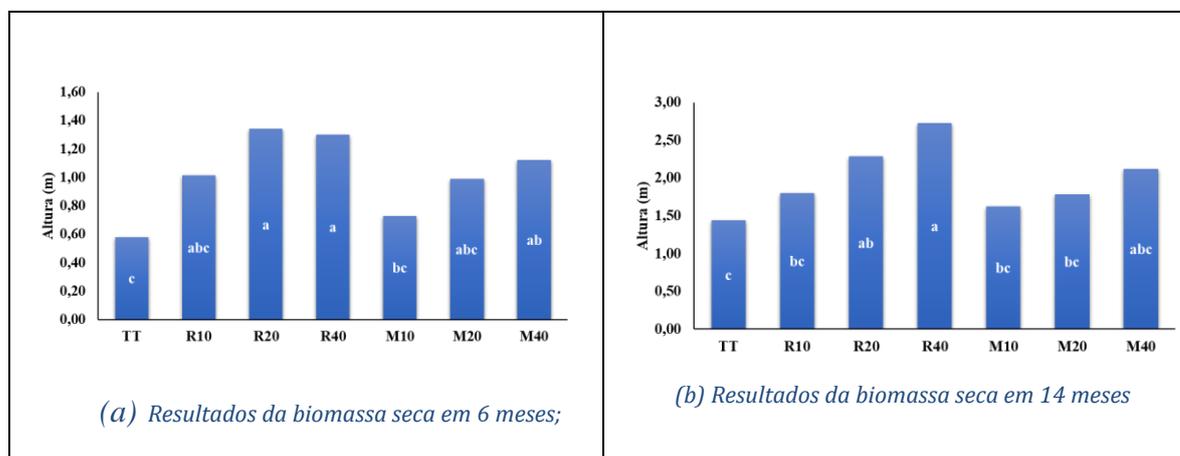
Tabela 3 – Atributos químicos do tecnossolo avaliados aos 6 e 14 meses do experimento. (continuação)

Tratamentos	pH		Corg		P		SB		CTC		V		m	
	-----H2O-----		-----g kg-1-----		-----mg dm-3-----		-----cmolc dm-3-----				-----(%)-----			
Coleta	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses	6 meses	14 meses
10 a 20cm														
TT	5,2 ^a	5,0 ^a	1,4 ^a	1,2 ^a	03,9 ^a	00,0 ^a	0,3 ^a	0,3 ^a	1,6 ^a	2,4	21,5 ^a	12,2 ^a	19,7 ^a	5,2 ^a
R10	5,2 ^a	5,0 ^a	2,1 ^a	0,7 ^a	05,5 ^a	00,4 ^a	0,4 ^a	0,3 ^a	1,9 ^a	2,2	21,4 ^a	15,0 ^a	20,2 ^a	6,3 ^a
R20	5,2 ^a	5,0 ^a	2,2 ^a	1,6 ^a	03,6 ^a	15,0 ^a	0,5 ^a	0,5 ^a	1,8 ^a	2,5	31,2 ^a	19,1 ^a	17,2 ^a	12,1 ^a
R40	5,0 ^a	4,9 ^a	2,1 ^a	1,5 ^a	30,3 ^a	00,2 ^a	0,8 ^a	0,5 ^a	2,0 ^a	2,9	31,2 ^a	17,9 ^a	15,5 ^a	3,6 ^a
M10	5,3 ^a	4,9 ^a	1,7 ^a	1,2 ^a	03,7 ^a	00,1 ^a	0,4 ^a	0,3 ^a	1,9 ^a	2,3	23,0 ^a	12,7 ^a	17,7 ^a	4,4 ^a
M20	5,2 ^a	5,0 ^a	2,3 ^a	1,3 ^a	03,6 ^a	00,4 ^a	0,3 ^a	0,5 ^a	1,7 ^a	2,8	19,9 ^a	19,2 ^a	26,7 ^a	0,0 ^a
M40	5,3 ^a	5,0 ^a	1,7 ^a	2,3 ^a	00,3 ^a	00,1 ^a	0,2 ^a	0,3 ^a	1,8 ^a	2,7	13,3 ^a	13,0 ^a	35,5 ^a	2,8 ^a
20 - 40cm														
TT	5,2 ^{ab}	4,9 ^a	2,2 ^a	1,1 ^a	2,0 ^a	0,00 ^a	0,2 ^a	0,4 ^{ab}	1,4 ^a	2,8 ^a	16,8 ^a	13,2 ^{ab}	34,7 ^a	11,2 ^a
R10	5,2 ^{ab}	4,8 ^a	2,3 ^a	0,9 ^a	12,7 ^a	0,20 ^a	0,4 ^a	0,3 ^{ab}	2,0 ^a	2,3 ^a	21,3 ^a	12,8 ^{ab}	11,0 ^b	06,5 ^a
R20	5,2 ^{ab}	4,9 ^a	3,5 ^a	1,3 ^a	1,2 ^a	0,05 ^a	0,4 ^a	0,3 ^{ab}	1,2 ^a	2,4 ^a	25,4 ^a	14,0 ^{ab}	20,4 ^{ab}	08,7 ^a
R40	5,0 ^b	4,8 ^a	1,6 ^a	2,2 ^a	6,0 ^a	0,10 ^a	0,5 ^a	0,5 ^a	1,6 ^a	2,5 ^a	25,4 ^a	19,0 ^a	19,8 ^{ab}	00,0 ^a
M10	5,3 ^a	4,9 ^a	3,3 ^a	1,0 ^a	3,7 ^a	0,05 ^a	0,2 ^a	0,2 ^b	1,5 ^a	2,2 ^a	17,8 ^a	11,5 ^{ab}	26,4 ^{ab}	06,0 ^a
M20	5,2 ^{ab}	4,9 ^a	2,8 ^a	1,1 ^a	3,7 ^a	0,40 ^a	0,3 ^a	0,4 ^{ab}	1,7 ^a	2,6 ^a	17,7 ^a	15,3 ^{ab}	26,7 ^{ab}	07,5 ^a
M40	5,3 ^a	5,0 ^a	2,0 ^a	1,6 ^a	0,3 ^a	0,01 ^a	0,4 ^a	0,2 ^b	2,3 ^a	2,4 ^a	18,1 ^a	09,5 ^b	22,0 ^{ab}	20,2 ^a

5.3 Altura e biomassa seca do feijão guandu

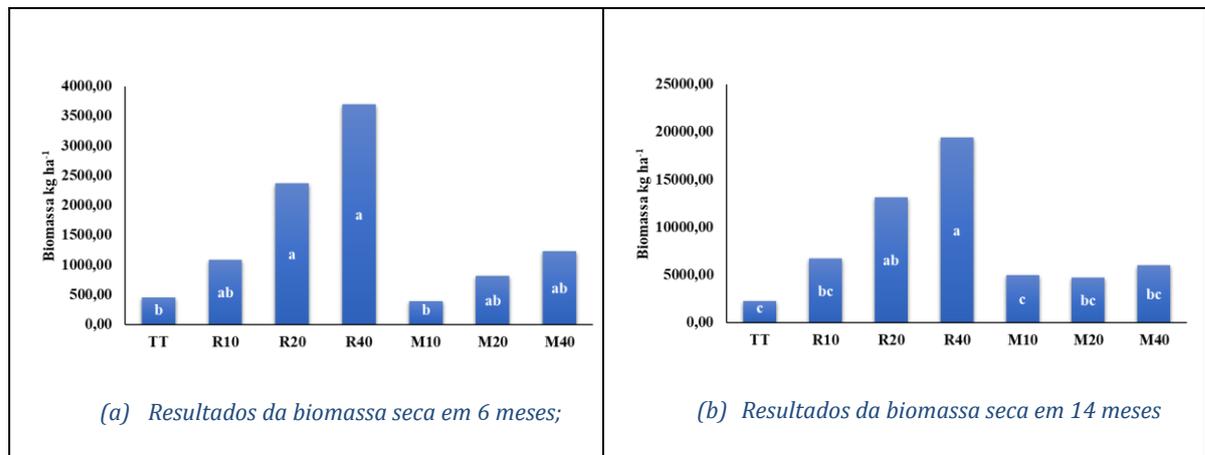
Em ambos os períodos de amostragem após a instalação do experimento, as doses de resíduo de refeitório de 20 e 40 t ha⁻¹ (R20 e R40) e 40 t ha⁻¹ de resíduo de madeira (M40), com 134,0; 130,9 e 112,0 cm, respectivamente (primeira amostragem), de 229,0; 279,0 e 212,0 cm, respectivamente (segunda amostragem) foram as que influenciaram positivamente no aumento da altura do feijão guandu, em relação ao testemunha (TT), com 60 e 144 cm, primeira e segunda amostragem, respectivamente (Figura 11). No último período amostral, muito embora os tratamentos R40 e R20 não tenham se diferenciaram de M 40, M20, M10 e R10 para esta variável, estes três últimos também não se diferenciaram de TT e isso resulta que a aplicação de resíduo de refeitório em doses ≥ 20 t ha⁻¹ e de madeira 40 t ha⁻¹ no estéril foram mais efetivas para o aumento da altura das plantas de guandu. Com relação à produção de biomassa seca do guandu em ambos os períodos amostrais, os melhores resultados foram obtidos nos tratamentos com a aplicação de doses ≥ 20 t ha⁻¹ de resíduos de refeitório, com 13,12 t ha⁻¹ para R20 e 19,39 t ha⁻¹ para R40, já que os demais tratamentos não se distanciaram de TT, com 2,25 t ha⁻¹ (Figura 12).

Figura 11 – Altura do feijão guandu aos 6 meses e aos 14 meses de condução do experimento (m).



Para a variável, a média seguida da mesma letra não difere significativamente entre si no teste de Tukey a 5%.

Figura 12 – Biomassa do feijão guandu aos 6 meses e aos 14 meses de condução do experimento (kg ha^{-1}).



Para a variável, a média seguida da mesma letra não difere significativamente entre si no teste de Tukey a 5%.

Quando comparamos os valores de altura do feijão guandu nos tratamentos R20, R40 obtidos nesse trabalho, com valores encontrados por outros autores em solos agricultáveis, os mesmos não se distanciam, ressaltando-se que no presente trabalho o quando cresce sobre tecnosolo em área após lavra de bauxita. Azevedo (2020) chegou aos valores máximos de altura de 257,5 cm e 260,7 cm, próximos também de Miranda et al. (1989), com 270 cm em solos.

Por ocasião da primeira floração os valores de biomassa seca do feijão guandu obtidos neste experimento, variando entre $0,45 \text{ t ha}^{-1}$ em TT a $3,70 \text{ t ha}^{-1}$ em R40, foram inferiores aos observados por Cavalcante et al. (2012) que obtiveram $8,70 \text{ t ha}^{-1}$, na primeira floração em solos agricultáveis. Contudo, aos 14 meses de condução do experimento, os valores encontrados em R20 e R40, $13,12$ e $19,39 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente foram superiores aos encontrados por Fonseca et al., (2022), com 18 meses de condução de experimento em área de compensação ambiental, $8,54 \text{ t ha}^{-1}$.

6. CONCLUSÕES

As variáveis físicas não foram afetadas pela aplicação de resíduos orgânicos ao estéril em curto período;

As doses mais altas de resíduos desidratados refeitório e de madeira em decomposição incorporadas ao estéril propiciaram efeitos positivos no Corg e 40 t ha⁻¹ M afetou positivamente a CTC apenas aos 6 meses;

Os resíduos orgânicos incorporados ao estéril propiciaram o estabelecimento da cobertura vegetal inicial, sendo as doses de 20 e 40 t ha⁻¹ R foram as que propiciaram ganhos de altura e biomassa seca do guandu, apresentando o melhor desempenho no o fim do ciclo experimental.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. **Bauxita no Brasil: Mineração Responsável e Competitividade**. Disponível em: <http://abal.org.br/downloads/publicacoes/bauxita-no-Brasil-mineracao-responsavel-e-competitividade-eng.pdf>. Em 2019. Acessado em 09/06/2022

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. **Alumínio Cadeia Primária**. Disponível em: <https://abal.org.br/noticia/consumo-de-produtos-de-aluminio-em-2021-registra-o-maior-volume-historico/> Acessado em 09/06/2022.

ABBOTT, L. K., Murphy, D. V. **What is soil biological fertility?** Soil biological fertility. The Netherlands: Springer; 2007. P. 1-15.

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. **Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto**. R. Bras. Ci. Solo, 28:519-531, 2004.

AKALA, V. A. and Lal, R. 2000. **Potential of mine land reclamation for soil organic carbon sequestration in Ohio**. Land Degrad. Devel. 11: 289-297.

ALVAREZ, M. B. S.; Gagne and H. Anton, 1995. **Effect of compost on rhizosphere microflora of the tomato and on the incidence of plant growth-promoting rhizobacteria**. Appl. Environ. Microbiol., 61: 194-199.

AMADO, F. R. C.; **Operação de preparação de terreno e plantação mecânica com alfaia Risutec**. Escola Superior Agrária Politécnico – ESAC. Dissertação. Coimbra. 2021.

ANDRADE, R. A. et. al. **Taxas de cobertura e decomposição de adubos verdes na Amazônia Sul Ocidental**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 1-15, 21 fev. 2022. Centro Universitário de Maringá. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2022v15n1e8600>. Acesso em: 28 fev. 2022.

ARTICO, M. **Recuperação de áreas degradadas através do uso integrado de lodo de esgoto e rejeito de mineração de basalto como substituto ao solo de cobertura**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2018.

ARENA, A. Curso de Suelos - **Física de Suelos**. Rio de Janeiro: Centro Pan-Americano de Aperfeiçoamento para Pesquisas de Recursos Naturais (CEPERN), Instituto Pan-Americano de Geografia e História, OEA e Ministério da Agricultura do Brasil. 1968. 72p.

ATENA, E. **Classificação e Cartografia dos Solos**. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/09/E-book-> .pdf. Acessado em 23/05/2022.

ASENSIO, V.; Flórido, F.G.; Ruiz, F.; Perlatti, F.; Otero, X.L.; Oliveira, D.P.; Ferreira, T.O. **The potential of a Technosol and tropical native trees for reclamation of copper-polluted soils.** Chemosphere 2019, 220, 892–899.

BARBARICK, K.A.; Ippolito, J.A. **Nitrogen fertilizer equivalency of sewage biosolids applied to dryland winter wheat.** Journal of Environmental Quality, Madison, v. 29, p. 1345 - 1351, 2000.

BARBER, R. G., NAVARRO, F. **Evaluation of the characteristics of 14 cover crops used in a soil rehabilitation trial.** Land degradation & rehabilitation, vol 5,201-214 (1994)

BARREIRA, E. C., **A exaustão da atividade minerária e suas implicações socioambientais: análise jurídica do fechamento de mina como instrumento de proteção Ambiental.** Programa de Pós- Graduação em Direito da Escola Superior Dom Helder Câmara. 2015.

BARROS, D. A. de; GUIMARÃES, J. C. C.; PEREIRA, J. A. A.; BORGES, L. A. C.; SILVA, R. A.; PEREIRA, A. A. S. **Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas alkaline massif and its socio-environmental impacts.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 1, p. 127-133, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672012000100018>

BARBOSA, L.M. coord. **MANUAL PARA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS DO ESTADO DE SÃO PAULO:** Matas Ciliares do Interior Paulista. São Paulo: Instituto de Botânica, 2006. p.52-70.

BARROS, D. A.; PEREIRA, J. A. A.; FERREIRA, M. M.; SILVA, B. M.; FILHO, D. F.; NASCIMENTO; G. O. **Soil physical properties of high mountain fields under bauxite mining.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 37, n. 5, p. 419-426,. 2013.

BELTRAME, T. P., Rodrigues E., **Feijão guandu (Cajanus cajan (L.) Millsp.) na restauração de florestas tropicais.** Ciências Agrárias, vol. 28, núm. 1, enero-marzo, 2007, pp. 19-28. Em: 2007

BIZUTI, D. T., Robin, A., Soares, T. M., Moreno, V. S., Almeida, D. R., Andreote, F. D., ... & Brancalion., **Multifunctional soil recovery during the restoration of Brazil's Atlantic Forest after bauxite mining.** Journal of Applied Ecology. P. H. (2022).

BORBA, J. M. H., **Supressão vegetal e compensação ambiental: uma análise a partir dos empreendimentos implantados em áreas de mata atlântica de Pernambuco no período de 2012 a 2015.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE. Recife – 2020.

BRANCALION, P. H. S., Rodrigues, R. R., Gandolfi, S. **Restauração florestal.** Oficina de Textos. (2015).

BRADY N.C; WEIL, R.R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. ed. Porto Alegre: Editora Bookman; 2013.

BRASIL. **Lei nº 13.575**. Criação da Agência Nacional de Mineração (ANM); extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM); altera as Leis nº 11.046, de 27 de dezembro de 2004, e 10.826, de 22 de dezembro de 2003; e revoga a Lei nº 8.876, de 2 de maio de 1994, e dispositivos do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). 26 de dezembro de 2017.

BRASIL. Decreto n. 97.632 de 10 de abril de 1989. **Regulamenta o artigo 2º, inciso VIII, da Lei Federal nº 6.938/81, obrigando o empreendedor minerário a apresentar, ao órgão ambiental competente, plano de recuperação de área degradada. Brasília, DF, 1989.**

BRASIL. **Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm. Acesso em 17/07/2021.

BRASIL. **Ministério de minas e energias**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/conheca-a-importancia-da-mineracao-na-vida-dos-brasileiros>. Acesso em: 10 de julho de 2021.

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIEGAS, I. Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. **Embrapa Amazônia Oriental-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 01, de 23 de janeiro de 1986. **Estabelecerem as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental**. Brasília, DF.

CAMPELLO, E. F. C., FRANCO, A. A. **Estratégia de recuperação de áreas degradadas**. In: MARTINS, C. E.; ALENCAR, C. A. B. de; BRESSAN, M. (Ed.)

CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J. A.; SOUZA, L. S. **Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, n.6, p.1123-1137, 2003.

CANELLAS, L. P., VELLOSO, A. C. X, MARCIANO, C. R., RAMALHO, J. F. G. P., RUMJANEK, V. M., RESENDE, C. E., SANTOS, G. A., **Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 935-944, 2003.

CARDOSO, J. G. da R.; CARVALHO, P. S. L. de; FONSECA, P. S. M. da; SILVA, M. M. da; ROCIO, M. A. R. A indústria do alumínio: estrutura e tendências. **BNDES Setorial**, RJ, n. 33 , p. 43-88, mar. 2011.

CARVALHO CASTANHO, Guilherme Gurian. **Avaliação de dois trechos de uma Floresta Semidecidual restaurada por meio de plantio, com 18 e 20 anos, no Sudeste do Brasil**. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo,

Piracicaba, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-18052009-163446/publico/Guilherme_Castanho.pdf>. Acesso em: 30 maio 2022.

CARVALHO, D. B. et al. **Fertilidade do solo em integração lavoura-pecuária na região de Guarapuava/ PR**. Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais, v.3, n.1, p.57-65, 2005.

CARVALHO, R. P. B. **Contribuições da análise de geossistemas na recuperação de áreas degradadas por mineração**. Caderno de Geografia, Belo Horizonte, v.21, n.36, p.13-28, jul./dez., 2011.

Chantigny MH, Rochette P. e Angers **DA Short-term C and N dynamics in a soil amended with pig slurry and barley straw: a field experiment** Can. J. Soil Sci. 2001 81 131 13 Canadian Journal of Soil Science May 2001

CHEN, G.; WEIL, R. R. **Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops**. Soil and Tillage Research, v. 117, p. 17-27, 2011.

CHITRAVADIVU, C. V. Balakrishnan, J. Manikandan, T. Elavazhagan and S. Jayakumar. **Application of Food Waste Compost on Soil Microbial Population in Groundnut Cultivated Soil**, India. Journal of Scientific Research 4 (2): 90-93, 2009

CONCEIÇÃO PC, Bayer C, Dieckow J, Santos DC. **Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo**. Ci Rural. 2014; 44: 794-800.

COELHO, Selma Regina de Freitas et al.. **Crescimento, nutrição e fixação biológica de nitrogênio em plantios mistos de eucalipto e leguminosas arbóreas**. Pesquisa Agropecuária Brasileira [online]. 2007, v. 42, n. 6 [Acessado 26 Julho 2021], pp. 759-768. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600001>>. Epub 23 Jul 2007. ISSN 1678-3921. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600001>.

COLOMBI, T. et al. **Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils**. Science of the Total Environment, v. 574, p. 1283-1293, 2017.

CORÁ, J. E. et al. **Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de açúcar**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

Corrêa RS. **Recuperação de áreas degradadas pela mineração no cerrado**. 2ª.ed. Brasília, DF: Universa; 2009.

COSTA, E.M.; SILVA, H.F.; RIBEIRO, P.R.A. **Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas**. Enciclopédia Biosfera; v.9, n.17, p. 1842-1860, 2013.

COSTA, S.; Zocche, J. J, **Fertilidade de solos construídos em áreas de mineração decarvão na região sul de Santa Catarina**. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Extremo Sul Catarinense (UNESC), 2002.

CUBILLA. M., REINERT. D. J., AITA. C., REICHET. J. M., **PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO: UMA ALTERNATIVA PARA ALIVIAR A COMPACTAÇÃO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Solos 97105-900 Santa Maria, RS. 2008

CUNHA, T. J. F.; Mendes, A. M. S.; Giongo, V. **Matéria orgânica do solo**. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Org.). Recurso solo: propriedades e usos. São Carlos: Cubo, 2015. cap. 9, p. 273-293.

DAWS, M. I., Standish, R. J., Koch, J. M., Morald, T. K., Tibbett, M., & Hobbs, R. J.. **Phosphorus fertilisation and large legume species affect Jarrah Forest restoration after bauxite mining**. Forest Ecology and Management, 354, pag. 10–17. 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Anuário mineral estadual do Pará**, 2017.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 3.ed. Brasília, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FARIAS, L. N. et al., **Características morfológicas e produtivas de feijão guandu anão cultivado em solo compactado**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17, n.5, p.497–503, 2013.

Ferreira J.M.C.; Vieira D.L.M.; Walter B.M.T. **Transposição de “Topsoil” (Camada Superficial do Solo) para a Restauração Ecológica no Cerrado**. In Embrapa Comunicado Técnico ISSN 0102-0110. Brasília, DF, 2015.

FINATTO, J.; ALTMAYER, T.; MARTINI, M.C. et al. **A importância da utilização da adubação orgânica na agricultura**. Revista Destaques Acadêmicos, v.5, n.4, p.85-93, 2013.

FIALHO, Lucimar Lopes; DA SILVA, Wilson Tadeu Lopes; MILORI, Debora M. B.; SIMOES, Marcelo Luiz; MARTIN-NETO, Ladislau; SAAB, Sergio da Costa. **Interferência da Lignina na Quantificação de Radicais Livres no Processo de Compostagem**. Química Nova, v. 33, n. 2, p. 364-369, 2010.

FONTANELI, R.S.; FONTANELI, R.S. **Qualidade de forragem. Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região Sul-Brasileira**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, Cap.1, p.25-31, 2009.

FORJÁN, R.; RODRÍGUEZ-VILA, A.; CERQUEIRA, B.; AMANO, M.; ASENSIO FANDIÑO, V.; COVELO E. F. Assesment of compost and technosol as amendments to increase nutrient contents in a mine soil vegetated with brassica juncea. **Spanish Journal of Soil Science**, v.8 (3), P. 306-321, 2018.

GARDNER, J. H.; BELL, D. T. **Bauxite mining restoration by Alcoa World Alumina Australia in Western Australia: social, political, historical, and environmental contexts.** Restoration Ecology, Washington, v.15, n.4, p.3-10, 2007.

GOVERNO DO BRASIL. **Mineração tem saldo de US\$ 49 bilhões em 2021 e garante balança comercial positiva.** Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/02/mineracao-tem-saldo-de-us-49-bilhoes-em-2021-e-garante-balanca-comercial-positiva>. Acesso em: 15/06/2022.

GUARESCHI, R. F., PEREIRA, M. G., SOARES, P. F. C., DA COSTA BARROS, F., PERIN, A., & ROSSI, C. Q. **Compartments of organic matter in an Oxisol under different types of no-tillage systems.** Semina:Ciencias Agrarias, 39(2), 533–548. 2018.

GUIMARÃES, R. N.; MATOS, A. T.; CARPANEZ, T. G.; **Alterações químicas e sanitárias em solos e estéril de mineração receptores de lodo de esgoto sanitário, composto orgânico e fertilizante mineral.** Belo Horizonte (MG), Brasil. Universidade Federal de Minas Gerais. 31/01/ 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200225>

GRIFFITH, J.J. **O estado da arte de recuperação de áreas mineradas no Brasil.** Em: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1., 1992, Curitiba. Curitiba: FUPEF, 1992. p. 77-82.

HYDRO. **Hydro Alunorte - Alumina do Norte do Brasil S/A.** AnnualReport – 2014. Disponível em: <http://www.hydro.com/en/Investor-relations/Reporting/Annual-report-2014/>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

Holtz, B.A., McKenry, M.V. & Caesar-TonThat, T.C. 2004 **Wood chipping almond brush and its effect on the almond rhizosphere, soil aggregation and soil nutrients** Acta Hort. 638 127 137 acessado em: https://wwwlib.teiep.gr/images/stories/acta/Acta%20638/638_15.pdf

IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis, **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: Técnicas de revegetação.** Brasília, 1990. 75p

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/mineracao-industrial-brasileira-fecha-2020-com-desempenho-positivo/> . Acesso em: 10 de julho de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA, **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: Técnicas de revegetação.** Brasília, 1990. 13p/S.

IUSS Working Group WRB, 2014. **World reference base for soil resources 2014.** International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps,

World Soil Resources Reports No. 106. Rome, FAO. <https://doi.org/10.1017/S0014479706394902>.

IUSS Working Group WRB, 2006. **World reference base for soil resources 2006**. A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Reports No. 103. Rome, FAO.

KÄMPF, N. et al. **Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do baixo Jacuí (RS)**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.21, p.79-88, 1997.

KLEIN, C. **UTILIZAÇÃO DE SUBSTRATOS ALTERNATIVOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS**¹. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, p. 43-63, 2015.

JANGORZO, N. S.; WATTEAU, F.; SCHWARTZ, C. **Evolution of the pore structure of constructed Technosols during early pedogenesis quantified by image analysis**. Geoderma, 207, 180-192, 2013.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Ed. Universidade de Passo Fundo. 3º edição, 2014.

LANZANOVA et al. da. **Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, n. 4, p. 1333- 1342, Viçosa, Julio- Agosto 2010.

LIMA, E. V. **Plantas de cobertura e calagem superficial na fase de implantação do sistema de plantio direto em região de inverno seco**. 2004. 133f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Área de Concentração em Agricultura, Botucatu-SP, 2004.

LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. Í.; MELO, W. J. D. **Uso da adubação verde na recuperação de solos degradados por mineração na floresta amazônica**. Bragantia, v. 70, 139-146, 2011.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo: teoria e prática**. 2.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002. 182p.

MACDONALD, S. E., Landhäuser, S. M., Skousen, J., Franklin, J., Frouz, J., Hall, S., Quideau, S. **Forest restoration following surface mining disturbance: Challenges and solutions**. New Forests, 46, 703–732. 2015.

MAZZUCO, Kátia Teresinha Mateus et al. **Uso da Canavalia ensiformis como fitorremediador de solos contaminados por chumbo**. 2008.

MELO, F.L., Simão, J.B.P., Caiado, M.A.C. & Rangel, O.J.P. 2013. **Vegetação como instrumento de proteção e recuperação de taludes**. Revista Verde Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, 8(5): 116-124.

MIAO, Z.; MARRS, R. **Ecological restoration and land reclamation in open-costa mines in Shanxi Province, China.** Journal of Environmental Management, v.59, n.3, p.205-215, 2000.

MOIR, M. L., Brennan, K. E. C., Koch, J. M., Majer, J. D., & Fletcher, M. J. **Restoration of a forest ecosystem: The effects of vegetation and dispersal capabilities on the reassembly of plant-dwelling arthropods.** Forest Ecology and Management, 217(2-3), 294-306. (2005).

Moreira, F. L. M., MOTA, F. O. B., CLEMENTE, A. C., AZEVEDO, B. M., BOMFIM, G. V., **Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará.** Revista Ciência Agronômica, v.37, n.1, p.7-12, Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2006.

MOREIRA, Vitor et al.. **Características adaptativas da associação simbiótica e da fixação biológica do nitrogênio molecular em plantas jovens de Lonchocarpus muehlbergianus Hassl., uma leguminosa arbórea nativa do Cerrado.** Rodriguésia [online]. 2014, v. 65, n. 2 [Acessado 26 Julho 2021] , pp. 517-525. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S2175-78602014000200013>>. Epub 01 Jul 2014. ISSN 2175-7860. <https://doi.org/10.1590/S2175-78602014000200013>.

MATOS, A.T. **Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos. 1. ed.** Viçosa: Ed. Universidade de Federal de Viçosa - UFV, 2014. 240p

Nogueira, N.O., Oliveira, O.M., Martins, C.A.S. & Bernardes, C.O. 2012. **Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas.** Enciclopédia Biosfera, 8(14): 21-31.

NETO, P.H.W.; CAIRES, E.F.; JUSTINO, A.; DIAS, J. **Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário.** Ciência Rural, v. 30, n. 2, p. 257-261, 2000.

NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, C.F. **Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um latossolo argiloso.** Ciência Rural, v.36, p.1410-1415, 2006.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C.L. Fertilidade do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solos**, et al, 2007.

NOVO, L.A.B., Covelo, E.F., González, L., **The use of waste-derived amendments to promote the growth of Indian mustard in copper mine tailings.** Miner. Eng. 53, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.07.004>. 2013.

O LIBERAL,. **Matéria sobre a Mineração Paragominas.** Disponível em: <https://www.oliberal.com/estudio/hydro-paragominas-completa-15-anos-na-mineracao-de-bauxita->

ROKIA, S., Séré, G., Schwartz, C., Deeb, M., Fournier, F., Nehls, T., Damas, O., Vidal-Beaudet, L., 2014. **Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes.** Waste Manag. 34, 2155–2162. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.016>.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p. 29-48, 2003.

RUIZ, F., Perlatti, F., Oliveira, D, P., Ferreira, T, O., 2020. **Revealing Tropical Technosols as an Alternative for Mine Reclamation and Waste Management.** Minerals

REVISTA DO ALUMINIO. **Especial Mineração de Bauxita: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil.** Revista do alumínio, ed. 55; set, 2019. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/especial-mineracao-de-bauxita-como-e-feita-a-extracao-e-qual-a-importancia-da-atividade-para-o-brasil/> - Acesso em: 15/06/2022

RIAA – **Relatório de Informações Ambiental Anual.** Período e julho de 2021 a junho de 2022. Paragominas, 2022.

RIGBY, H.; Clarke, B.; Pritchard, D.; Meehan, B.; Beshah, F.; Smith, S.; Porter, N. **A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment.** Science of the Total Environment, v. 541, p. 1310 – 1338, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.089>

RYAN, J.A.; Keeney, D.R.; Walsh, L.M. **Nitrogen transformation and availability of an anaerobically digested sewage sludge in soil.** Journal of Environmental Quality, Madison, v.2, n.4, p. 489 - 492, 1973.

ROSSET, J. S., Alberto, J. S., Marra, M. L., Castilho, P. C. S., Ozório, J. M. B., Lima, R. P., Borsoi, A., Souza, C. L., **Carbono total e mineralizável do solo adubado com diferentes fontes de fertilizantes e resíduos orgânicos.** Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - Campus de Mundo Novo. 2019.

SALOMÃO, R. P., Rosa, N. A., & Morais, K. A. C. **Dinâmica da regeneração natural de árvores em áreas mineradas na Amazônia.** Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais, 2(2), 85-139., (2007).

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos. 2. ed.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 496p

SÁNCHEZ, L. E. **Planejamento para fechamento prematuro de minas.** REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 64, n. 1, p. 117-124, 2011.

SANTINI, T.C.; Fey, M.V. **Assessment of Technosol formation and in situ remediation in capped alkaline tailings**. *Catena* 2016, 136, 17–29.

SANTOS, E. E. F. et al. **Desenvolvimento de cebolinha sob diferentes doses de esterco de curral associado à adubação mineral**. In: Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE). *Horticultura Brasileira*, Brasília, DF, v. 23, n. 2, ago. 2005. Suplemento. 1 CD-ROM., 2005.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356 p.

SANTOS, L. M. **Restauração de campos ferruginosos mediante resgate de flora e uso de topsoil no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais**. 2010. 128p. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.917-926, 2000.

SCIVITTARO, W. B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E. **Dinâmica de adubos verdes no sistema solo-planta**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. 33 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 127). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/33522/1/documento-127.pdf>. Acesso em 14/06/2022.

SCHOLTUS, N.; Echevarria, G.; Florentin, L.; Bonis, M.L.; De, P.; Simonnot, M.O.; Morel, J.L. **Expected evolution of a Technosol derived from excavated Callovo-Oxfordian clay material**. *J. Soils Sediments* 2014, 15, 332–346.

Schwertmann U. & Taylor R.M. 1989. **Iron oxides**. In: Dixon J.B. & Weed S.B. (eds.) *Minerals in soil environments*. Soil Science Society of America, Madison, p.:789-824

SER – Society for Ecological Restoration. **Society for Ecological Restoration International's primer on ecological restoration**. (2004). Disponível em português em: https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/SER_Primer/ser-primer-portuguese.pdf . Acessado em: 5 jan. 2022.

SÉRÉ, G.;SCHWARTZ, C.; OUVARD, RENAT, S, SC.; WATTEAU, F.; VILLEMINE, G.; LOUIS, J ,M.; Early pedogenic evolution of constructed Technosols. **Journal of Soils and Sediments** v. 10, P.1246–1254, 2010.

Sheoran, P., Sardana, V., Sharma, P. **GROWTH AND PRODUCTION OF PULSES**. v. 3. Punjab Agricultural University, Ludhiana, 141 004, India Punjab Agricultural University, Ludhiana, 141 004, India. 2010

SILVA, E. N.; SOARES, I. A. **Extração Mineral de Caulim: Legislação, Processo Produtivo e Impactos Ambientais**. GEOTEMAS, 2021.

SILVA, I. A.; CAMPAGNA, A. R.; LIPP-NISSINEN, K. H. **Recuperação de áreas degradadas por mineração: uma revisão de métodos recomendados para garimpos**. Pesquisas em Geociências, 2018.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo Viçosa**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

SILVIA, M. D.; RODRIGUES, V. P.; NEVES, R. S.; BARBOSA, R. R.; MATSUNAGA, W. K.; Análise bromatológica do feijão guandu cultivado em sequeiro no semiárido para produção de forragens. *Bioeng*, v. 15, n. 3, p. 381-390, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n3p381-390>.

SILVA, M. H. M.; FRANTZ, R. M. G.; SANTOS, E.F. O.; JÚNIOR, A. V. F.; ARTNER, K. A. R.; SOARES, E. R.; NOGUEIRA, A. E. **Qualidade estrutural do solo em função do manejo em sistema integrado de produção agropecuária**. *Agroecossistemas*, v. 10, n. 1, p. 99-114, 2018. ISSN online 2418-0188.

SILVANUS - Asociación Profesional de Selvicultores de Galicia. **Preparación del terreno para la repoblación forestal**. Santiago de Compostela.1997.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. **A history of research on the link between (micro) agregates, soil biota, and soil organic matter dynamics**. *Soil and Tillage Research*, v.79, p.7-31, 2004.

SOARES, P. G.; CASTILHOS, Z. C. Recuperação de áreas degradadas pela mineração no Brasil.. In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INTERNA DO CETEM, 04. Rio de Janeiro. Anais. **CETEM/MCTI**, 2015.

SKRINDO, A.B. & Pedersen, P.A. **Natural revegetation of indigenous roadside vegetation by propagules from Topsoil**. *Urban Forestry & Urban Greening*. V3, n.1. p. 29-37, 2004

SOLERA, M., RIBEIRO, A., SOUZA, C., & CAMPOS, S. Modelos estruturais de bioengenharia de solos na revegetação de pilhas de estéril em mineração a céu aberto. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, (47), 74-88, 2018.

SOUZA, R. S. **Gênese e comportamento físico- hídrico de solos construídos em mina de bauxita no sudoeste paraense**. P. 12 (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, 2018.

SKOUSEN, J.; ZIPPER, C. E. **Post-mining policies and practices in the eastern USA coal region**. *International Journal of Coal Science and Technology*, v. 1, n. 2, p. 135–151, 2014.

STANDISH, R. J., Gove, A. D., Grigg, A. H., & Daws, M. I. **Beyond species richness and community composition: Using plant functional diversity to measure restoration success in jarrah forest.** *Applied Vegetation Science*, 24(3), e12607., (2021).

STEWART, B. A., Robinson, C. A. and Parker, D. B. 2000. **Examples and case studies of beneficial reuse of beef cattle byproducts.** Pages 387–407 in J. F. Power and W. A. Dick, eds. *Land application of agricultural, industrial and municipal byproducts.* SSSA Book Series No. 6, SSSA, Madison, WI.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions.** 2. ed. John Wiley, New York, USA. 496pp. 1994.

Toledo-Souza, E. D., SILVEIRA P. M., JUNIOR, M. L., FILHO, A. C. C., **Sistemas de cultivo, sucessões de culturas, densidade do solo e sobrevivência de patógenos de solo.** *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.43, n.8, p.971-978, ago. 2008.

TROSCHINETZ, A.M.; Mihelcic, J.R. **Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries.** *Waste Management*, Amsterdam, v.29, p.915-923, 2009.

TULLIO, L. **Formação, Classificação e Cartografia dos Solos.** 2019.

UNITED States Geological Survey - USGS. **Mineral Commodity Summaries 2020.** 1 st ed. Reston (VA): 200 p., <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>.

URBANSKA, K. M. WEBB, N. R.; EDWARDS, P. J. sites: **interface of plant population ecology and restoration ecology.** *Restoration ecology and sustainable development.* Cambridge: Cambridge University Press, 2004. p.81-110.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; & SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:11-19, 2004

VILLENAVE, C., Séré, G., Schwartz, C., Watteau, F., Jimenez, A., Cortet, J., 2018. **Rapid Changes in Soil Nematodes in the First Years after Technosol Construction for the Remediation of an Industrial Wasteland.** *Eurasian Soil Sci.* 51, 1266–1273. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100149>.

VAN Wesemael, b. Chartin, c., Wiesmeier, m., Von Lützow, m., Hobley, e., Carnol, m.; Kögel-knabner, I. An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 274, p. 62–75, 2019.

WEON, H.Y., J.S. Kwon, J.S. Suh and W.Y. Choi, 1999. **Soil microbial flora and chemical properties as influenced by the application of pig manure compost.** *Kor. J. Soil. Sci. Fert.*, 32: 76-83.

WRBSR. World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Rome, 2015.

XAVIER, A. A. P. Avaliação do acúmulo e emissão de carbono do solo sob sistemas produtivos de pastagem. **Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo- USP**, São Carlos. 2015.

ZHANG, L. W. JINMANWANG, Z. BAI, L.V. CHUNJUAN. **Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area** *Catena*, 128 (2015), pp. 44-53