

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

GUSTAVO VIEIRA NUNES

**ESTOQUE DE CARBONO E FERTILIDADE DE TECNOSSOLOS
ORIGINADOS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE SCHEELITA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

**RECIFE-PE
2024**

GUSTAVO VIEIRA NUNES

**ESTOQUE DE CARBONO E FERTILIDADE DE TECNOSSOLOS
ORIGINADOS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE SCHEELITA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Florestal da
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
como parte das exigências para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Ygor Jacques Agra Bezerra da
Silva

**RECIFE-PE
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N972e

Nunes, Gustavo Vieira

ESTOQUE DE CARBONO E FERTILIDADE DE TECNOSSOLOS ORIGINADOS DE REJEITOS DA
MINERAÇÃO DE SCHEELITA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO / Gustavo Vieira Nunes. - 2024.
39 f. : il.

Orientador: Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva.
Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em
Engenharia Florestal, Recife, 2024.

1. Solos tecnogênicos. 2. Geoquímica do solo. 3. Potencial agrícola. 4. Atividade de mineração. 5. Carbono orgânico. I.
Silva, Ygor Jacques Agra Bezerra da, orient. II. Título

CDD 634.9

GUSTAVO VIEIRA NUNES

**ESTOQUE DE CARBONO E FERTILIDADE DE TECNOSSOLOS
ORIGINADOS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE SCHEELITA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Aprovado em: 21 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Ms. Artur Henrique Nascimento da Silva
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

Ms. Géssyca Fernanda de Sena Oliveira Mergulhão
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

Dr. Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter saúde e determinação durante toda a minha jornada acadêmica e durante a conclusão deste trabalho de conclusão de curso;

A minha querida e amada mãe, Maria Francirle, agradeço do fundo do coração, por todo o apoio, puxões de orelha, incentivo e conselhos durante toda a minha vida;

Ao meu pai, Israel, e minha irmã, Juliana. Agradeço pelo apoio e suporte. Vocês foram importantes no percurso;

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva, não apenas pela orientação, mas pela disponibilidade, encorajamento, amizade e companheirismo, que foram fundamentais para realizar e prosseguir este estudo. Obrigado pelas críticas construtivas, discussões e conselhos, foram essenciais ao longo de todo o percurso, especialmente para o meu crescimento pessoal e profissional. Eternamente grato por todo o apoio;

Agradeço aos meus incríveis amigos, Adrielly Roberta e Vinícius Luiz, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado em todos os momentos. Obrigado pelos sorrisos nos dias difíceis e por sempre acreditarem em mim. Obrigado pelos momentos de descontração, cuidado e amizade;

Agradeço ao meu namorado, Severo, que esteve ao meu lado me apoiando, incentivando e iluminando meus dias escuros. Obrigado por tudo;

Agradeço aos membros que compuseram a banca avaliadora, Artur Nascimento e Géssyca Sena, por todas as valiosas contribuições para a realização deste trabalho;

Agradeço a Ana Letícia, Camila Brazil, Laura Nascimento, Maeli Chryslaine e Rayanna Jacques, membros do Grupo de Pesquisa em Geologia Aplicada a Solos e ao Ambiente (GPGASA) pelo suporte, apoio e momentos descontraídos;

Agradeço ao Grupo de Pesquisa em Química Ambiental de Solos (GQAS) e ao Laboratório de Mineralogia do Solo, pelo suporte prestado;

A todos aqueles que contribuíram para a conclusão da minha graduação de alguma forma e realização deste trabalho.

Nem sempre sou capaz de escolher minhas batalhas... Mas com efeito imediato, vou fazer um esforço para escolher as batalhas que importam.

Steve Rogers (Capitão América)

RESUMO

Estudar tecnossolos é essencial para compreender seu potencial para produção agrícola, recuperar áreas degradadas e sequestrar carbono. No semiárido do Nordeste brasileiro se encontra a maior mina de scheelita da América do Sul, os rejeitos dessa atividade acumulam-se desde a década de 40, impactando a qualidade ambiental. Embora os tecnossolos originados de rejeitos de mineração sejam estudados globalmente, informações sobre a fertilidade e o estoque de carbono orgânico desses solos são escassas no Brasil, especialmente em regiões semiáridas. Desse modo, o presente trabalho tem por principal objetivo avaliar o estoque de carbono e a fertilidade de tecnossolos construídos há 40 anos a partir de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro, com intuito de avaliar o seu potencial para uso agrícola e sequestro de carbono. Quarenta amostras compostas foram coletadas nos horizontes superficiais (0-30 cm) dos tecnossolos construídos a partir de rejeitos da Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos, região semiárida do estado do Rio Grande do Norte. A média da densidade do solo foi de $1,38 \text{ kg dm}^{-3}$, possivelmente não havendo impacto negativo nas propriedades físico-hídricas dos tecnossolos. A média do pH em água e em KCl foi de 8,53 e 8,07, respectivamente, com ΔpH médio de -0,47. A alcalinidade nos tecnossolos, devido a carbonatos nos tactitos e mármore (materiais formadores dos rejeitos), pode restringir o crescimento vegetal por causar desequilíbrios nutricionais e deficiências de micronutrientes. As concentrações médias disponíveis de P ($2,73 \text{ mg kg}^{-1}$) e K ($0,14 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) são limitações para a atividade agrícola, exigindo estratégias para a elevação desses nutrientes a fim de melhorar a viabilidade agrícola. A concentração média de carbono orgânico nos tecnossolos foi de $24,11 \text{ g kg}^{-1}$, mais do que o dobro da média observada em solos da Caatinga, que costuma ser de aproximadamente $9,3 \text{ g kg}^{-1}$. Os tecnossolos, derivados da mineração de scheelita, alcançaram estoques de carbono de até $222,93 \text{ Mg ha}^{-1}$, superando em mais de três vezes os Vertissolos ($60,08 \text{ Mg ha}^{-1}$) e mais do que dobrando a média nacional ($99,39 \text{ Mg ha}^{-1}$), destacando seu potencial para sequestro de carbono na região semiárida. Este estudo, diante da escassez de informações sobre tecnossolos derivados da mineração em ambientes semiáridos brasileiros, contribui não apenas para a comunidade científica, mas também para os formuladores de políticas, destacando a importância da gestão eficiente dos rejeitos de mineração na recuperação de áreas degradadas, na produção agrícola sustentável e no sequestro de carbono, crucial para mitigar as mudanças climáticas.

Palavras-chave: Solos antropogênicos; geoquímica do solo; solos tecnogênicos; atividade de mineração; potencial agrícola; carbono orgânico do solo.

ABSTRACT

Studying technosols is essential to understand their potential for agricultural production, reclaim degraded areas, and sequester carbon. In the semi-arid region of Northeast Brazil, the largest scheelite mine in South America is located, and waste from this activity has been accumulating since the 1940s, impacting environmental quality. Although technosols originating from mining waste are studied globally, information on the fertility and organic carbon stock of these soils is scarce in Brazil, especially in semi-arid regions. Therefore, this study aims to assess the carbon stock and fertility of technosols constructed 40 years ago from scheelite mining waste in the Brazilian semi-arid, with the purpose of evaluating their potential for agricultural use and carbon sequestration. Forty composite samples were collected from the surface horizons (0-30 cm) of technosols constructed from waste at the Brejuí Mine, located in the municipality of Currais Novos, in the semi-arid region of the state of Rio Grande do Norte. The average soil density was 1.38 kg dm^{-3} , potentially not negatively impacting the physico-hydraulic properties of the technosols. The average pH in water and KCl was 8.53 and 8.07, respectively, with a mean ΔpH of -0.47. The alkalinity in technosols, due to carbonates in tactites and marbles (materials forming the waste), may restrict plant growth by causing nutritional imbalances and micronutrient deficiencies. The average available concentrations of P (2.73 mg kg^{-1}) and K ($0.14 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) are limitations for agricultural activity, requiring strategies to increase these nutrients to improve agricultural viability. The average organic carbon concentration in technosols was 24.11 g kg^{-1} , more than double the average observed in Caatinga soils, which is typically around 9.3 g kg^{-1} . The technosols derived from scheelite mining achieved carbon stocks of up to $222.93 \text{ Mg ha}^{-1}$, surpassing Vertisols (60.08 Mg ha^{-1}) by over three times and more than doubling the national average (99.39 Mg ha^{-1}), highlighting their potential for carbon sequestration in the semi-arid region. This study, given the scarcity of information on technosols derived from mining in Brazilian semi-arid environments, contributes not only to the scientific community but also to policy-makers, emphasizing the importance of efficient mining waste management in the recovery of degraded areas, sustainable agricultural production, and carbon sequestration, crucial for mitigating climate change.

Keywords: Anthropogenic soils; soil geochemistry; technogenic soils; mining activity; agricultural potential; soil organic carbon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da metodologia aplicada no estudo.....	17
Figura 2 – Município de Currais Novos no mapa do Rio Grande do Norte e localização da área de estudo (Mina Brejuí).....	18
Figura 3. Área de descarte (tempo zero) dos rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro, estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos.....	20
Figura 4 – Demarcação dos pontos e localização do tecnossolo construído há 40 anos, originados de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro, estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos.....	21
Figura 5 – Boxplot da densidade do solo em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	23
Figura 6 – Boxplots do pH em água, pH em KCl e Delta pH em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	24
Figura 7 – Boxplots do fósforo disponível em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	26
Figura 8 – Boxplots do sódio trocável em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	27
Figura 9 – Boxplots do potássio trocável em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	29
Figura 10 – Boxplots do carbono orgânico em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	30
Figura 11 – Distribuição dos valores do estoque de carbono em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise descritiva da densidade do solo em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	22
Tabela 2 – Análise descritiva do pH em água, pH em KCl e Delta pH em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	24
Tabela 3 – Análise descritiva do fósforo disponível em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	25
Tabela 4 – Análise descritiva do sódio trocável em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	26
Tabela 5 – Análise descritiva do potássio trocável em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	28
Tabela 6 – Distribuição dos valores de Carbono Orgânico em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	29
Tabela 7 – Distribuição dos valores de Estoque de Carbono em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BSh – Clima semi-árido quente

CO – Carbono orgânico

CO₂ – Gás carbônico

COT – Carbono orgânico total

Ds – Densidade do solo

ECO – Estoque de carbono orgânico

Fe²⁺ – Ferroso

Fe³⁺ – Férrico

GEE – Gases do efeito estufa

H₂O – Molécula da água

K⁺ – Potássio trocável

KCl – Cloreto de potássio

MME – Ministério de minas e energia

Na⁺ - Sódio trocável

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

P - Fósforo

pH – Potencial hidrogeniônico

PIB – Produto Interno Bruto

SB – Soma de bases

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

T – Capacidade de troca de cátions potencial

t – Capacidade de troca de cátions efetiva

TFSA – Terra fina seca ao ar

V – Saturação por bases

WRB – World Reference Base for Soil Resources (Base de Referência Mundial para Recursos de Solos)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. HIPÓTESE	16
3. OBJETIVOS	16
3.1. GERAL	16
3.2. ESPECÍFICOS	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17
4.2. SELEÇÃO, COLETA E PREPARO DOS SOLOS	19
4.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1. DENSIDADE DO SOLO	22
5.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	23
6. CONCLUSÃO	33
7. REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional vem acompanhado por intensas atividades antrópicas que têm resultado na alteração de solos e consequente formação de solos antropogênicos em todo o mundo. Solos antropogênicos são aqueles cujos processos pedogenéticos são influenciados, modificados ou criados pela atividade humana, em contraste com solos formados por processos naturais. Em 2006, a edição do *World Reference Base for Soil Resources* (WRB), incluiu uma nova classificação de solos, a qual constitui os grupos dos Antropossolos e Tecnossolos (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006).

Antropossolos são solos resultantes da atividade agrícola humana de longo prazo. Tecnossolos são classificados taxonomicamente por apresentar no mínimo 20% desse material tecnogênico incorporado nos primeiros 100 cm, podendo ser selados ou conter uma geomembrana. Os artefatos são substâncias sólidas ou líquidas, criadas ou modificadas pelos seres humanos, ou extraídas de profundidades e depositadas em ambientes onde não ocorreriam naturalmente, como a exemplo dos rejeitos de mineração (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

A mineração é uma das principais atividades que contribui para o setor econômico. Em escala nacional, a mineração é responsável por mais de 200 mil empregos, respondendo por 8% do total de empregos do país, além de representar mais de 3 % do produto interno bruto (PIB) brasileiro (Paiva, 2023; Teixeira, 2023). Contudo, o reflexo dessa atividade antrópica é a geração de rejeitos e pilhas de entulhos expostos a céu aberto, os quais são capazes de causar danos ou desastres ambientais (Lino, 2023; Oliveira, 2023). Em contrapartida, esses rejeitos podem ser usados para construir tecnossolos. Nesse contexto, os tecnossolos surgem como alternativas inteligentes que não apenas fornecem destinos adequados para os rejeitos, mas também criam solos para revegetar e restaurar as áreas afetadas (Ribeiro *et al.*, 2024; Silva, 2023).

O Brasil possui a maior mina de scheelita da América do Sul, situada no semiárido do Nordeste e que está em atividade desde a década de 40 (Costa Filho, 2017). Considerada a maior mineradora, a Mina Brejuí foi um marco no desenvolvimento da cidade de Currais Novos. Entre 1943 e 1958, o mineral scheelita foi responsável pela segunda maior arrecadação de divisas na pauta de exportações do estado do Rio Grande do Norte, justamente por causa da província Scheelitífera do Nordeste, que ficou conhecida mundialmente pelo seu teor e quantidade de reservas. No entanto, durante o processo de beneficiamento da scheelita são geradas elevadas quantidades de rejeitos, sendo

acumulados sem proteção em pilhas a céu aberto, aproximadamente 6,5 milhões de toneladas de rejeitos finos e grossos (Ramos Filho, 2021). Esse enorme prejuízo se deve pelo foco da mineradora ser somente a scheelita e a sobra, considerada rejeito mineral.

Os rejeitos entulhados a céu aberto são considerados um grande problema, mas ainda podem ter um destino positivo, pois dão origem aos tecnossolos (Ribeiro *et al.*, 2024), os quais podem fornecer diversos serviços ambientais tais como: produtos vegetais para produção de alimentos e geração de energia, habitats para a biodiversidade, sequestro de carbono, entre outros, tornando-os viáveis sob pontos de vistas agrônômico, ambiental e econômico (Asensio *et al.*, 2019; Hedde *et al.*, 2019; Silva, 2023). Estudos apontam o sequestro de carbono como um dos processos mais importantes na pedogênese dos perfis de tecnossolos ao longo de uma cronosequência (Rees *et al.*, 2019; Ruiz *et al.*, 2020; Silva, 2023).

O estoque de carbono do solo está intimamente ligado com as mudanças climáticas, serviços ecossistêmicos e serviços ambientais como a redução da emissão de gases do efeito estufa (GEE) (Parron *et al.*, 2015; Sampaio, 2023). Nesse sentido, a construção desses tecnossolos no semiárido é considerada uma tecnologia de grande importância para garantir uma melhor qualidade do solo e combater as mudanças climáticas, assim como permitir de maneira menos onerosa a recuperação de áreas degradadas e o gerenciamento de resíduos das atividades de mineração (Ruiz *et al.*, 2020; Fabbri *et al.*, 2021; Sampaio, 2023).

Estudos que investiguem o estoque de carbono e o potencial agrícola de tecnossolos em regiões tropicais ainda são limitados, sendo ainda mais escassos quando comparados aos trabalhos realizados em regiões semiáridas do Nordeste. No contexto da crescente importância econômica e ambiental da atividade de mineração de scheelita no Brasil, o objetivo do trabalho se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) da ONU, contribuindo especialmente com o objetivo 15, que visa "proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da Terra e deter a perda da biodiversidade". Dessa forma, a intenção é expandir a discussão sobre o potencial desses tecnossolos para uso agrícola e sequestro de carbono, assim como o uso sustentável dos rejeitos provenientes da atividade de mineração no contexto semiárido brasileiro.

2. HIPÓTESE

Tecnossolos construídos há 40 anos a partir de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido apresentam fertilidade e estoque de carbono superior aos solos naturais da região de estudo.

3. OBJETIVOS

3.1. GERAL

Avaliar o estoque de carbono e a fertilidade de tecnossolos construídos há 40 anos, a partir de rejeitos da mineração de scheelita, no semiárido brasileiro

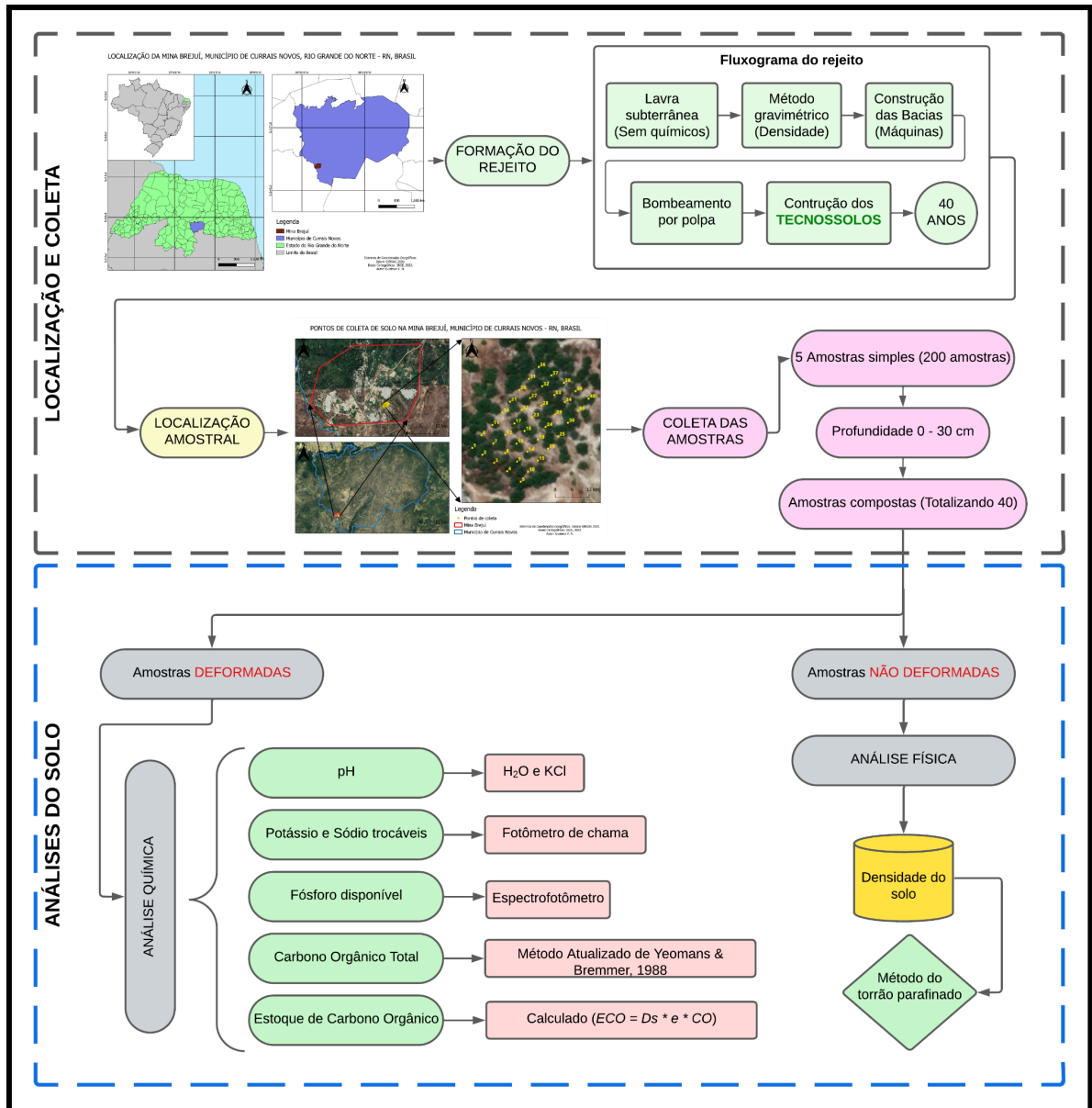
3.2. ESPECÍFICOS

- a) Determinar a fertilidade de tecnossolos construídos de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos;
- b) Calcular a densidade do solo de tecnossolos originados do minério de scheelita;
- c) Calcular o estoque de carbono desses tecnossolos construídos há 40 anos;
- d) Avaliar o potencial desses tecnossolos para uso agrícola e sequestro de carbono.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho pode ser visualizada no fluxograma apresentado na Figura 1. Informações acerca da localização, coleta das amostras e das metodologias aplicadas.

Figura 1. Fluxograma da metodologia aplicada no estudo.



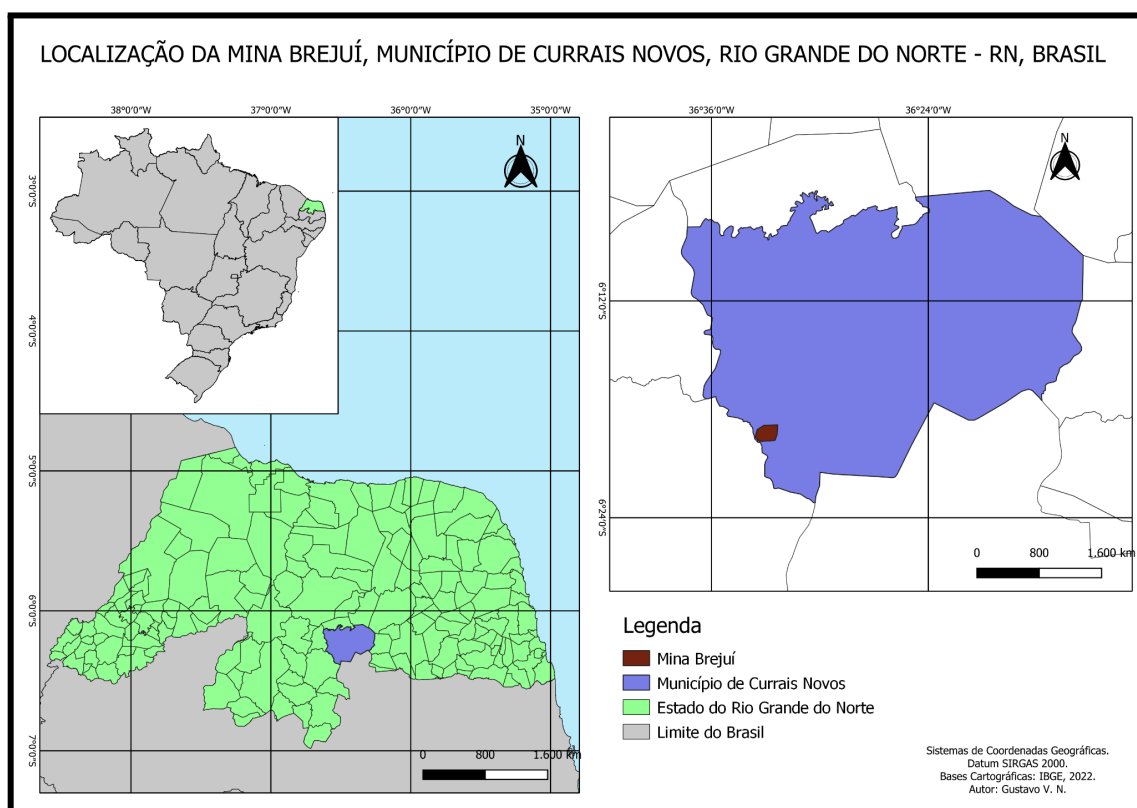
Fonte: Autoral (2023)

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no município de Currais Novos (Figura 2), na Zona Semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. O ponto de coleta está localizado na Mina Brejuí

(6°19'19" Sul e 36°32'52" Oeste), inserido na região Centro-Sul do estado, na Mesorregião Central Potiguar e Microrregião do Seridó Oriental (Dutra, 2019).

Figura 2. Município de Currais Novos no mapa do Rio Grande do Norte e localização da área de estudo (Mina Brejuí).



Fonte: Autoral (2023)

Situada a 189 km de Natal (capital do estado) e a 10 km do centro de Currais Novos, a Mina Brejuí, mesmo após diversas crises e reformas administrativas ao longo dos seus mais de 70 anos de atividade, é a maior mina de exploração de tungstato de cálcio (scheelita; CaWO_4) da América do Sul (Godeiro *et al.*, 2010).

Nesse depósito mineral estão presentes, em sua composição mineralógica, diversos tipos de rochas, como paragneisses acinzentados constituídos de quartzo, feldspato e biotita, além de epidoto, microclina, muscovita, minerais opacos, tremolita/actinolita, dentre outros, tendo destaque para as grandes reservas e principais minerais extraídos que são mármore e os tactitos.

A área em que se situa a mineradora tem clima semiárido com precipitações irregulares e secas prolongadas, sendo períodos chuvosos entre fevereiro e abril, com precipitação pluvial média de 610 mm ano^{-1} , o que caracteriza clima do tipo BSh (Kottek *et al.*, 2006). O bioma da região de estudo é composto por vegetação hiperxerófila. Possui

ainda hidrologia com baixo potencial, relevo com formações antigas e solos propensos a erosões (Dutra, 2019).

O minério de scheelita é extraído da Mina Brejuí através do processo de lavra subterrânea com cerca de 65 km de extensão e é constituída por túneis de até 900 m de profundidade (Gerab, 2014). Dentro dos limites geográficos em que se situa a Mina Brejuí, possui ainda uma vila de operários denominada de Comunidade da Mina Brejuí, sendo suas principais atividades econômicas o extrativismo mineral, o comércio e a agropecuária familiar.

Na etapa de beneficiamento não são utilizados produtos para separações químicas. Assim sendo, para beneficiar o tungstênio contido na scheelita é utilizado o princípio da gravidade devido a maior densidade da scheelita em relação a outros minérios presentes nas rochas (Ramos Filho, 2021). Estima-se que na etapa de beneficiamento da scheelita seja gerado aproximadamente 9,2 % de resíduos e apenas 0,8 % de minério de scheelita seja encaminhado para comercialização, gerando um acúmulo de rejeito estimado em 6,5 milhões de toneladas de resíduos grossos e finos (Ramos Filho, 2021). Como resultado, são encontrados vários tecnossolos construídos por rejeitos em torno da mina desde o início de suas operações, durante a Segunda Guerra Mundial (Ramos Filho, 2021).

4.2. SELEÇÃO, COLETA E PREPARO DOS SOLOS

As áreas de deposição dos rejeitos são escolhidas com base em sua profundidade, dando preferência para regiões mais fundas, a fim de ampliar a capacidade de armazenamento. Para a construção dos tecnossolos nestas áreas, utiliza-se escavadeiras mecânicas ou tratores de esteira. Esses tecnossolos são moldados a partir do próprio material local, que é compactado sob o peso do maquinário. Em média, os tecnossolos têm profundidade de cinco metros e largura de aproximadamente três metros. A transferência dos rejeitos para as bacias é realizada pelo bombeamento da polpa, que, posteriormente, leva à formação dos tecnossolos (Figura 3). Quando a capacidade da bacia chega a 80 % de seu total, uma nova é feita para construção de novos tecnossolos.

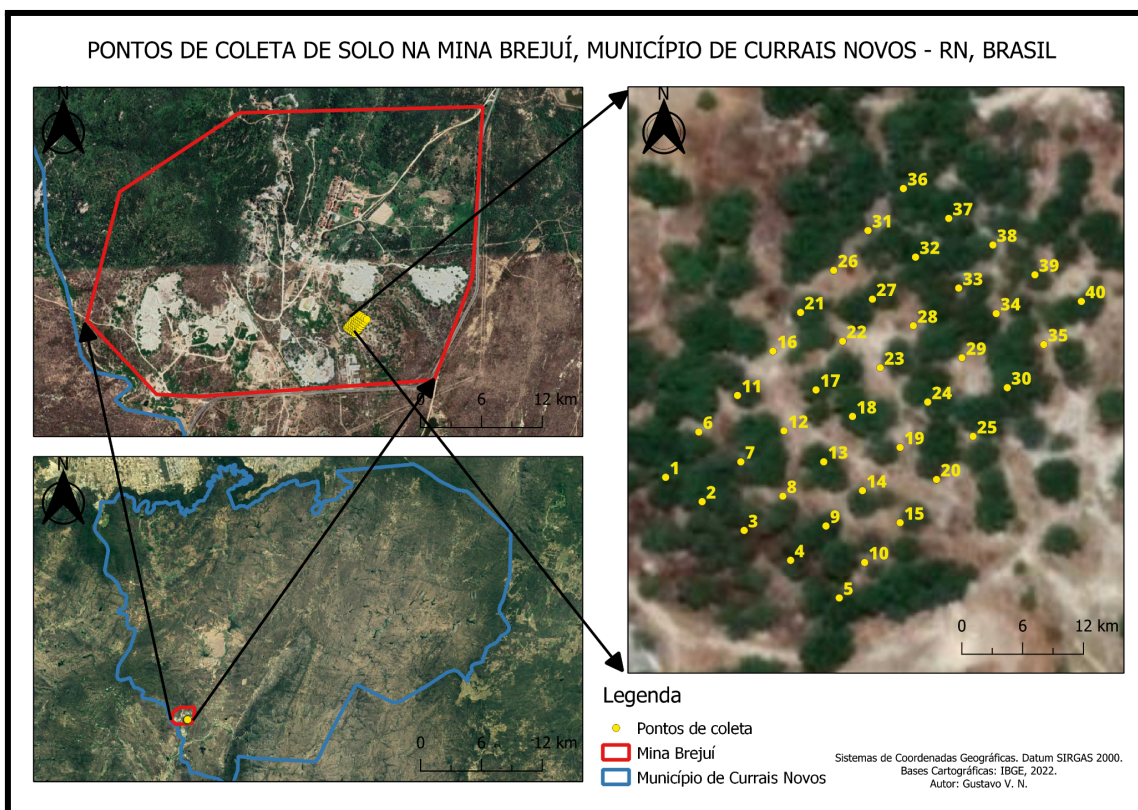
Figura 3. Área de descarte (tempo zero) dos rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro, estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos.



Fonte: Autoral.

As amostras de tecnossolos foram selecionadas, previamente, usando o programa *google earth*, o qual fornece um mosaico de imagens antigas da paisagem, e, por meio de informações fornecidas pelos engenheiros de minas da Mineradora Brejuí. Com base nessas informações foi possível selecionar tecnossolos derivados de rejeitos da mineração de scheelita construídos há 40 anos. A coleta das amostras de solo foi realizada nos horizontes superficiais (0 a 30 cm). Foram coletadas 40 amostras de solo compostas, obtidas a partir de cinco amostras simples, coletadas no entorno de uma amostra central, deformadas e não deformadas para realização das análises químicas e físicas, respectivamente (Figura 4). Para as análises químicas, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm (Terra Fina Seca ao Ar - TFSA).

Figura 4. Demarcação dos pontos e localização do tecnossolo construído há 40 anos, originados de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro, estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos.



Fonte: Autoral. (2023)

4.3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA

A densidade do solo (método do torrão parafinado) foi calculada de acordo com Teixeira *et al.* (2017). O carbono orgânico total (COT) foi analisado pelo método de Walkley-Black (Yeomans & Bremmer, 1988). O estoque de carbono orgânico (ECO) foi calculado conforme Weisert *et al.* (2016) de acordo com a equação abaixo:

$$ECO = Ds * e * CO$$

Em que “Ds” é a densidade do solo (g/cm^3); “e” é a espessura (m) da camada analisada e “CO” é o teor de carbono orgânico (%) na camada avaliada.

O pH foi determinado em água e KCl 1 mol L^{-1} (1: 2,5 solo: solução) no potenciômetro. O potássio e sódio trocáveis e fósforo disponível foram extraídos com extrator Mehlich-1 (1:10 solo:solução) e determinados por fotômetro de chama (K^+ e Na^+) e espectrofotômetro (P).

Os resultados analíticos foram avaliados por meio de procedimentos estatísticos univariados e técnicas de mapeamento de sistemas de informações geográficas. Para os métodos univariados foram utilizadas a estatística descritiva (média, mediana, moda, variância, máximo, mínimo e desvio padrão). A análise da distribuição espacial das variáveis foi realizada por meio do Sistema de Informação Geográfica (SIG), usando as técnicas de interpolação determinística com base na extensão da similaridade, para a geração de mapas autorais acerca da área estudada e para a distribuição dos resultados obtidos das análises físicas e químicas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

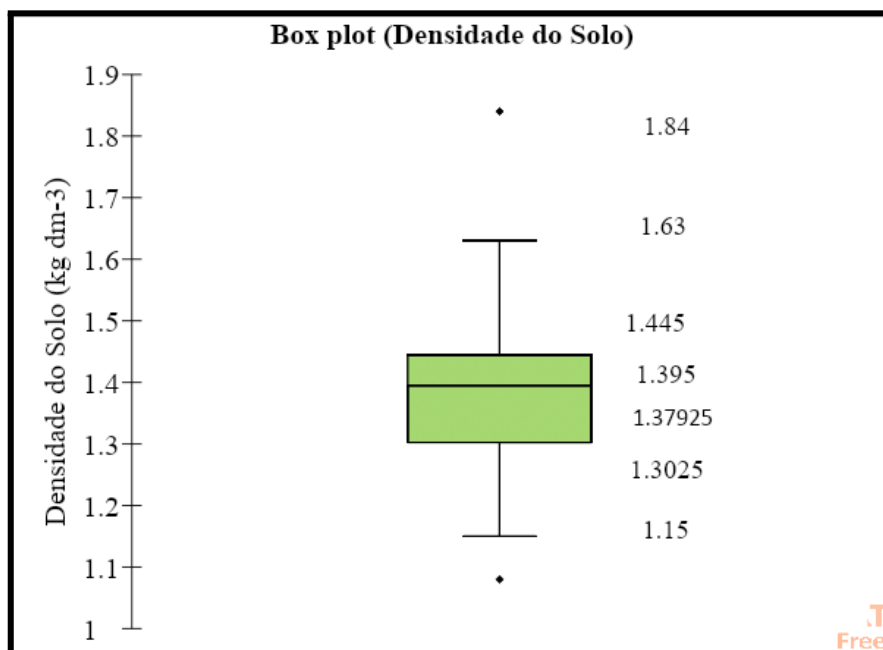
5.1. DENSIDADE DO SOLO

A densidade do solo em tecnossolos construídos há 40 anos a partir de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido variou de 1,08 kg dm⁻³ a 1,84 kg dm⁻³, com média e mediana de 1,38 kg dm⁻³ e 1,40 kg dm⁻³ (Tabela 1; Figura 5). O estudo conduzido por Silva (2023) sobre a gênese de perfis de tecnossolos derivados de rejeitos de mineração de scheelita, com a mesma idade e localizado na mesma região, corroborou com achados similares de densidade do solo, oscilando de 1,47 kg dm⁻³ a 1,81 kg dm⁻³.

Tabela 1. Análise descritiva da densidade do solo em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.

Estatística descritiva	Densidade do Solo (kg dm ⁻³)
Número de observações	40,00
Mínimo	1,08
Máximo	1,84
1st quartil (Percentil 25 %)	1,30
Mediana	1,40
3rd Quartil (Percentil 75 %)	1,45
Média	1,38
Variância	0,02
Desvio padrão	0,15

Figura 5. Boxplot da densidade do solo em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.



Fonte: Autoral (2023).

Os valores críticos de densidade do solo para o crescimento vegetal encontrados na literatura, tomam como base a composição granulométrica dos solos (Reichert *et al.*, 2003). Os autores estabeleceram o valor de 1,45 g cm⁻³ para solos argilosos (> 55 % argila), 1,55 g cm⁻³ para solos de textura média (20 a 55 % de argila) e 1,65 g cm⁻³ para solos de textura arenosa (< 20 % argila). Com base nos valores de densidade identificados em tecnossolos de 40 anos e na gênese examinada por Silva (2023), constata-se que, de modo geral, possivelmente não há impacto negativo significativo nas propriedades físico-hídricas dos tecnossolos, incluindo porosidade, condução e retenção de água, além da penetração de raízes. Isso se deve à predominância de texturas franco-arenosas e areno-francas que favorecem essas características.

5.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

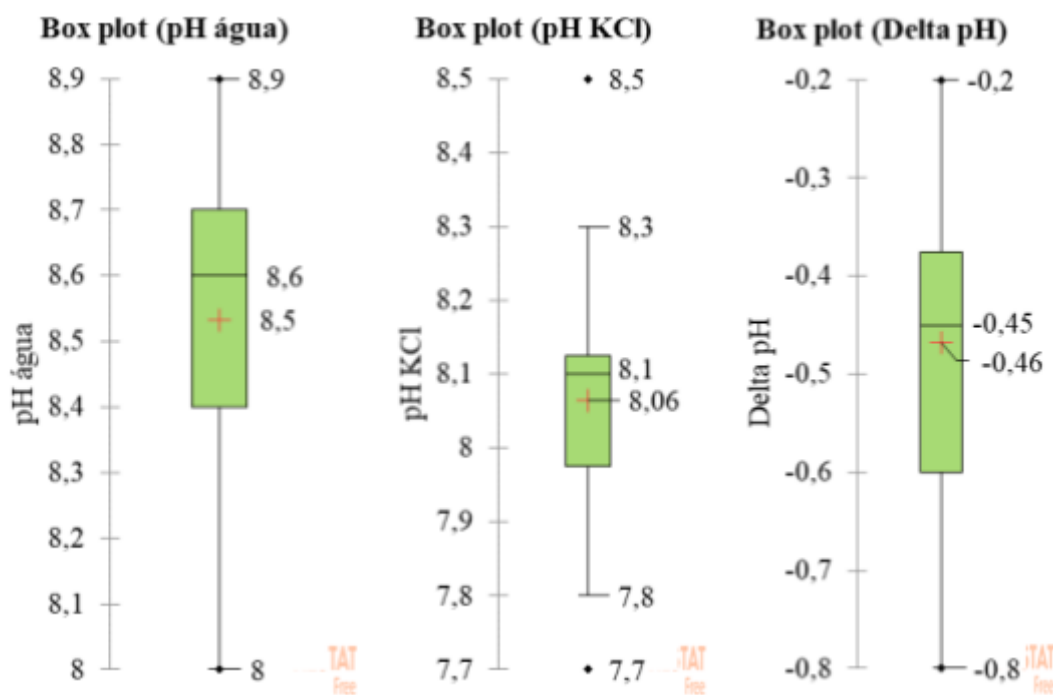
O horizonte superficial do tecnossolo construído há 40 anos a partir de rejeitos da mineração de scheelita apresentou pH em H₂O superior ao pH em KCl (Tabela 2), sendo alcalinos. Portanto, resultando em valores negativos de ΔpH, variando de -0,2 a -0,8. Logo, retendo mais cátions do que ânions.

Tabela 2. Análise descritiva do pH em água, pH em KCl e Delta pH em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.

Estatística descritiva	pH água	pH KCl	Delta pH
Número de observações	40	40	40
Mínimo	8	7,7	-0,8
Máximo	8,9	8,5	-0,2
1st quartil (Percentil 25 %)	8,4	7,98	-0,6
Mediana	8,6	8,1	-0,45
3rd quartil (Percentil 75 %)	8,7	8,13	-0,38
Média	8,53	8,07	-0,47
Variância	0,04	0,03	0,02
Desvio padrão	0,2	0,18	0,15

Os valores de pH apresentaram dispersão relativamente baixa em relação à média. O pH em água teve maior variância e desvio padrão em relação aos valores de pH em KCl e Δ pH. A média do pH em água e em KCl foi de 8,53 e 8,07, respectivamente (Figura 6). Já a média do Δ pH foi de -0,47.

Figura 6. Boxplots do pH em água, pH em KCl e Delta pH em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.



Fonte: Autoral (2023).

O caráter alcalino observado nos tecnossolos (Tabela 2) está relacionado à presença de carbonatos na composição do tactito e do mármore, materiais formadores dos rejeitos. Esse caráter pode limitar o crescimento das plantas (Negrão *et al.*, 2017) e gerar desbalanço nutricional e deficiência de micronutrientes (principalmente Fe e Mn) (Barros *et al.*, 2010). Segundo Lindsay (1979), aumentar o pH do solo em uma unidade pode reduzir a atividade de Fe^{3+} e Fe^{2+} em 1000 e 100 vezes, respectivamente. Em decorrência do pH alcalino desses tecnossolos, a disponibilidade de alguns metais pesados pode ser reduzida, uma vez que essa condição propicia a formação de óxidos e hidróxidos insolúveis (Nascimento *et al.*, 2020). Ademais, o elevado pH do solo pode afetar a dissociação de grupos funcionais na matéria orgânica, tais como carboxila, fenólica, alcoólica e carbonila, o que aumenta a capacidade de retenção de elementos catiônicos no solo (Aguiar, 2022).

Tabela 3. Análise descritiva do fósforo disponível em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.

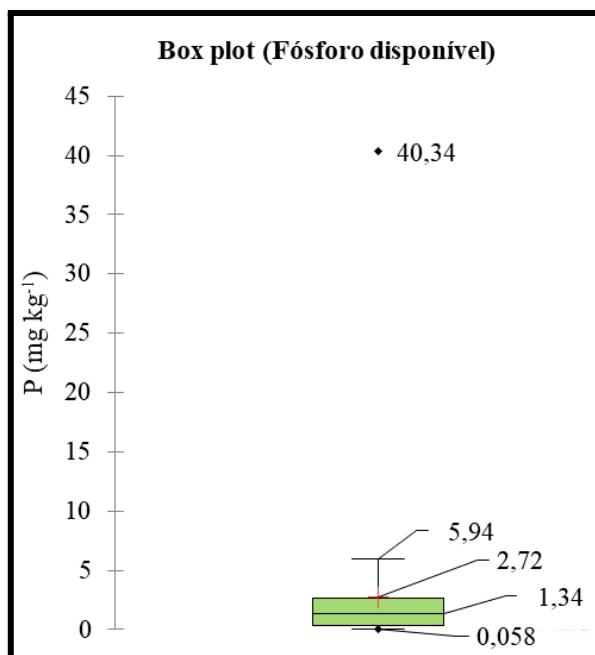
Estatística descritiva	P disponível (mg kg⁻¹)
Número de observações	39,00
Mínimo	0,06
Máximo	40,34
1st quartil (Percentil 25 %)	0,36
Mediana	1,35
3rd quartil (Percentil 75 %)	2,60
Média	2,73
Variância	40,92
Desvio padrão	6,40

A baixa concentração disponível de P nos tecnossolos é uma limitação para a atividade agrícola (Tabela 3), com concentração média de 2,73 mg kg⁻¹. Segundo Gomes & Costa (2008), concentrações de P no solo abaixo de 11 mg dm⁻³, caso dos tecnossolos estudados, são consideradas baixas para a cultura do feijão em Pernambuco. Logo, estratégias como a adição de resíduos orgânicos nos tecnossolos, quando disponíveis, devem ser adotadas (Moreira *et al.*, 2006; Salcedo, 2006).

É importante destacar que o P já é considerado um nutriente limitante para a prática da agricultura no semiárido do Nordeste brasileiro, por causa dos baixos níveis observados

nos solos (Sampaio *et al.*, 1995). A maior concentração de P no tecnossolo (40,34 mg kg⁻¹) pode estar relacionada à presença de esterco de caprino durante a coleta desta amostra (Figura 7).

Figura 7. Boxplots do fósforo disponível em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.



Fonte: Autoral (2023).

Apesar da baixa disponibilidade de alguns nutrientes, os tecnossolos possuem elevada reserva natural de nutrientes nos minerais primários, nas frações argila e areia (ex: biotita, feldspato e actinolita) (Silva, 2023), sendo possível disponibilizar os nutrientes a médio prazo e superar as limitações nutricionais da atividade agrícola. A presença do mineral apatita em um dos materiais formadores (gnaisse) do rejeito utilizado para construir os tecnossolos pode vir a ser uma importante fonte de P para as plantas.

Tabela 4. Análise descritiva do sódio trocável em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.

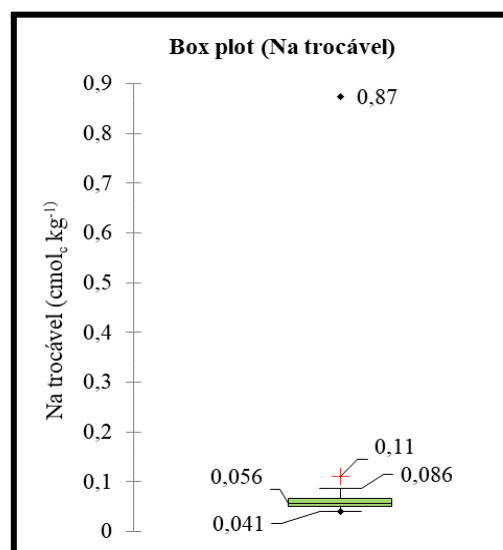
Estadística descritiva	Na trocável (cmol _c kg ⁻¹)
Número de observações	39,00
Mínimo	0,04
Máximo	0,87
1st quartil (Percentil 25 %)	0,05
Mediana	0,06

3rd quartil (Percentil 75 %)	0,07
Média	0,11
Variância	0,03
Desvio padrão	0,19

A partir do observado na tabela 4, é possível ver que a variância e o desvio padrão do Na⁺ no solo é baixa (0,03 e 0,19 cmol_c kg⁻¹, respectivamente). A concentração de sódio nos solos se deve pelas condições de alta taxa de evaporação e baixa precipitação, associadas ao material de origem e as condições geomorfológicas e hidrológicas (Matos, 2023). Os baixos valores encontrados possuem visão positiva, pois o sódio não é considerado um elemento essencial às plantas, porém é benéfico, dessa forma, valores altos de sódio podem gerar problemas nas propriedades físicas e químicas do solo.

O sódio pode ser prejudicial para o crescimento das plantas, pois sua toxicidade e restrições físicas (principalmente estruturais) podem interferir no desenvolvimento, dificultando a penetração das raízes e a circulação adequada de água e ar no solo (Vian & Tiecher, 2023). Essa limitação provocada pelo sódio ocorre geralmente em regiões semiáridas e áridas, interferindo diretamente nos cultivos de espécies agrícolas (de Souza *et al*, 2023). Os tecnossolos com 40 anos de desenvolvimento apresentaram baixa disponibilidade de Na⁺ (Figura 8), exibindo concentração mínima de 0,04, máxima de 0,87 e média de 0,11 cmol_c kg⁻¹.

Figura 8. Boxplots do sódio trocável em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.



Fonte: Autoral (2023).

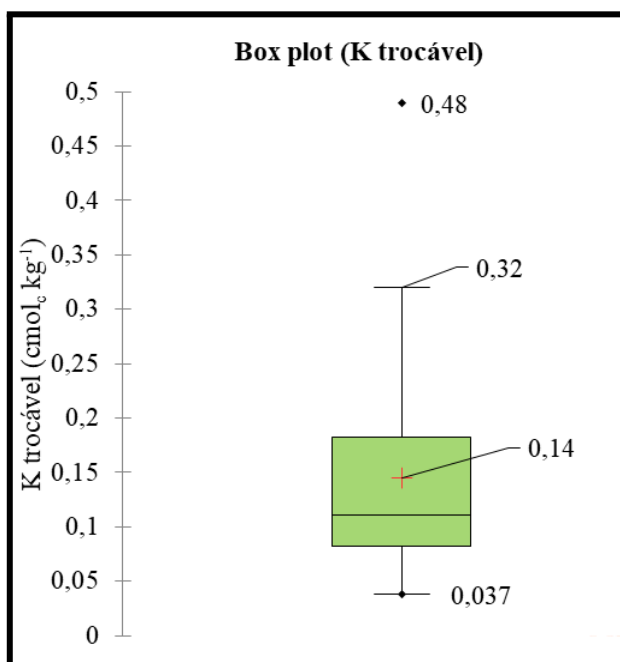
Foi encontrado baixa concentração disponível de K^+ nos tecnossolos com 40 anos, com média de $0,14 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, com mínimo de $0,04 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e máximo de $0,49 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Tabela 5). A mediana encontrada foi de $0,11 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Figura 8), indicando que metade das amostras possui valores abaixo e, metade, acima desse valor. O K^+ também é considerado uma importante limitação para a atividade agrícola no Brasil. De acordo com Scherer (1998), o nível crítico para o desenvolvimento da soja no Latossolo é de $0,16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Com base nessa referência, os solos estudados apresentam 62,5 % das amostras abaixo, e, 37,5 %, acima do exigido. Contudo, no semiárido do Nordeste predominam solos menos desenvolvidos e por esse motivo extrapolar ao nível crítico para outras culturas e solos da região não é recomendado.

Tabela 5. Análise descritiva do potássio trocável em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.

Estatística descritiva	K trocável ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)
Número de observações	39,00
Mínimo	0,04
Máximo	0,49
1st quartil (Percentil 25 %)	0,08
Mediana	0,11
3rd quartil (Percentil 75 %)	0,18
Média	0,14
Variância	0,01
Desvio padrão	0,10

Com base nos valores definidos por Ambonatti, (2023) e Brasil e Cravo (2007), os tecnossolos apresentam disponibilidades de K^+ de baixa a intermediária (Figura 9). Portanto, é recomendado adotar estratégias que incluam a adição de resíduos orgânicos aos tecnossolos para aumentar a disponibilidade de K^+ , quando esses resíduos estiverem disponíveis.

Figura 9. Boxplots do potássio trocável em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.



Fonte: Autoral (2023).

A profundidade de 0-30 cm é comumente usada para avaliar o estoque de carbono orgânico do solo devido à sua alta interferência antrópica e significativa concentração de CO (Silva, 2023). Os tecnossolos estudados apresentaram valores elevados de CO com concentrações mínima e máxima de 2,96 g kg⁻¹, 60,91 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 6). A concentração média de carbono orgânico nos tecnossolos foi de 24,11 g kg⁻¹, mais que o dobro da média observada em solos da Caatinga, que é de 9,3 g kg⁻¹ (Menezes et al., 2012).

Tabela 6. Distribuição dos valores de Carbono Orgânico em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.

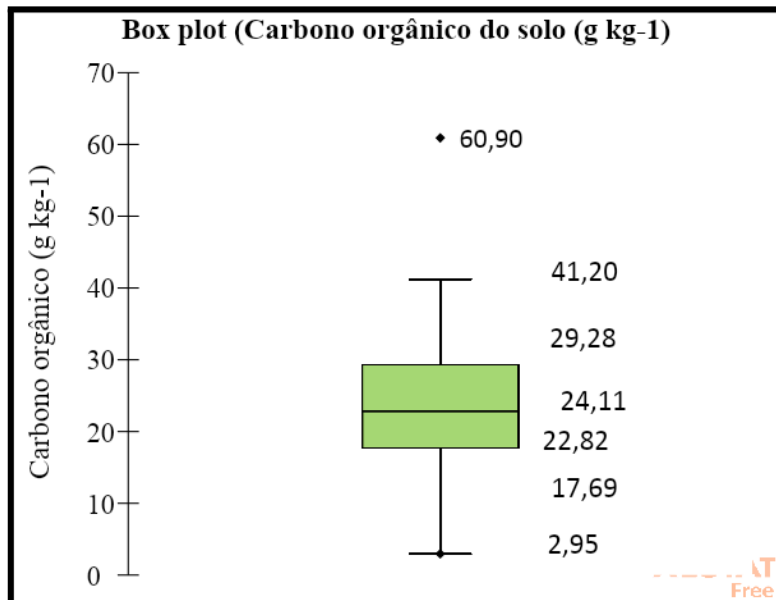
Estatística descritiva	Carbono orgânico do solo (g kg⁻¹)
Número de observações	40,00
Mínimo	2,96
Máximo	60,91
1st quartil (Percentil 25 %)	17,70
Mediana	22,82
3rd quartil (Percentil 75 %)	29,29
Média	24,11

Variância	135,94
Desvio padrão	11,66

A distribuição espacial do carbono orgânico apresentou alta irregularidade, evidenciada pela elevada variância e desvio padrão (Figura 10). Essa constatação destaca a relevância de investigar a distribuição superficial de CO em tecnossolos provenientes de rejeitos de mineração.

Os altos teores de carbono orgânico possuem alta correlação com a elevada concentração de Ca^{2+} encontrada nos tecnossolos (Silva, 2023). Os elevados teores de Ca nos tecnossolos contribuem para a formação de agregados e estabilização da matéria orgânica (Lützow *et al.*, 2006). Comprovações científicas destacam a importância do cálcio no ciclo do carbono devido às interações com a matéria orgânica e a estabilização do carbono orgânico do solo, por meio da complexação, prevenindo sua mineralização (Rowley *et al.*, 2021; Caldeira *et al.*, 2023). Dessa forma, podemos definir que o elevado teor de CO está interligado com as concentrações de cálcio nos tecnossolos.

Figura 10. Boxplots do carbono orgânico em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.



Fonte: Autoral (2023).

A região semiárida brasileira, com suas altas temperaturas e limitada adição de matéria orgânica ao solo, apresenta condições desfavoráveis para a acumulação de carbono orgânico (CO), conforme indicado por Bernoux *et al.* (2002). No entanto, a relevância dos

estoques de CO nos solos dessa região não deve ser subestimada. Araújo Filho *et al.* (2022) relatam que as classes de solos naturais da área possuem estoques de carbono variando entre 28,9 Mg ha⁻¹ em Neossolos Regolíticos e 60,08 Mg ha⁻¹ em Vertissolos, até uma profundidade de 30 cm.

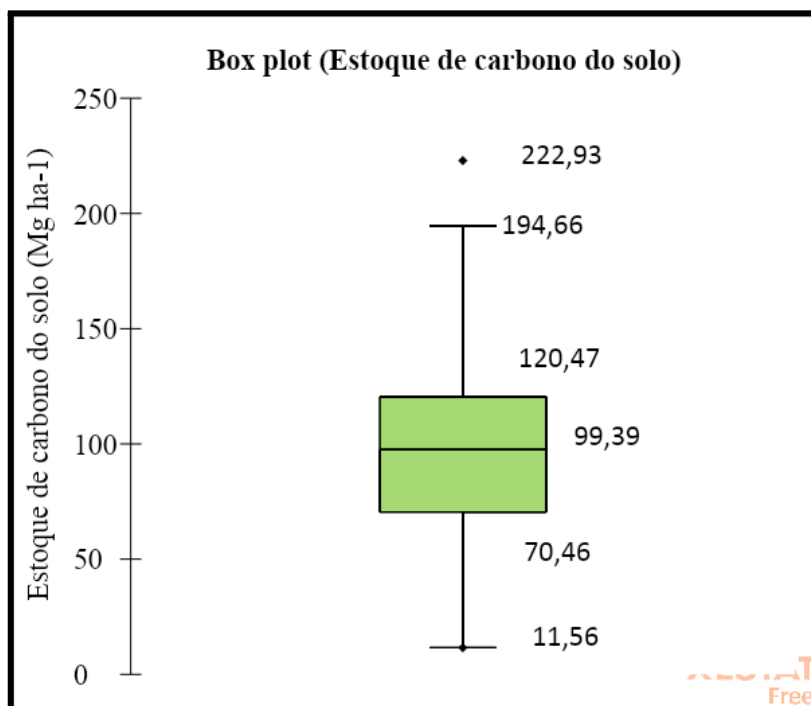
Comparando os estoques de carbono de tecnossolos com 40 anos de desenvolvimento, sob idênticas condições climáticas e profundidade, identificou-se uma média de 99,39 Mg ha⁻¹ (Tabela 7). Este valor supera a capacidade de armazenamento de CO dos solos naturais da Caatinga em sua vegetação nativa. Notavelmente, os tecnossolos com 40 anos alcançaram estoques de até 222,93 Mg ha⁻¹, mais de três vezes a média dos Vertissolos (60,08 Mg ha⁻¹). Estes últimos são reconhecidos por sua alta capacidade de armazenar carbono na região semiárida do Nordeste (Silva, 2023).

Tabela 7. Distribuição dos valores de Estoque de Carbono em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.

Estatística descritiva	Estoque de carbono do solo (Mg ha⁻¹)
Número de observações	40,00
Mínimo	11,57
Máximo	222,93
1st quartil (Percentil 25 %)	70,47
Mediana	97,51
3rd quartil (Percentil 75 %)	120,39
Média	99,39
Variância	2363,10
Desvio padrão	48,61

Em âmbito nacional, tecnossolos com 40 anos armazenam mais de duas vezes o carbono orgânico (99,39 Mg ha⁻¹) (Figura 11) que a média dos solos brasileiros (44 Mg ha⁻¹), conforme Gomes *et al.*, (2019). Isso evidencia o significativo potencial dos tecnossolos derivados da mineração de scheelita para o sequestro de carbono na região semiárida (Silva, 2023). Tais solos podem ser cruciais na redução dos níveis de CO₂ atmosférico e na mitigação das mudanças climáticas. Assim, o desenvolvimento de tecnossolos no semiárido configura uma estratégia vital para aprimorar a qualidade do solo e enfrentar os desafios das mudanças climáticas (Silva, 2023).

Figura 11. Distribuição dos valores do estoque de carbono em tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita há 40 anos no semiárido brasileiro.



Fonte: Autoral. (2023)

6. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstra a importância dos tecnossolos derivados a partir de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido do Nordeste brasileiro, evidenciando sua contribuição significativa na recuperação de áreas degradadas, na produção agrícola, no sequestro de carbono, além de subsidiar práticas sustentáveis benéficas ao meio ambiente e às comunidades locais.

A análise de tecnossolos com 40 anos de formação revelou uma densidade do solo que não compromete as características físico-hídricas e uma fertilidade marcada por alcalinidade e baixos níveis de fósforo e potássio, mas com concentrações de carbono orgânico significativamente elevadas, superando as médias locais e nacionais. Estes resultados destacam o potencial dos tecnossolos em contribuir para o sequestro de carbono na região semiárida.

O estudo também ressalta a necessidade de desenvolver estratégias para melhorar a fertilidade desses solos, visando aprimorar sua adequação para atividades agrícolas e maximizar seu potencial de uso, tanto para agricultura sustentável quanto para mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono. Além disso, foi possível constatar a relevância dos resultados encontrados para a comunidade científica e para formuladores de políticas públicas, oferecendo-lhes informações sobre a gestão eficiente dos rejeitos de mineração e destacando os tecnossolos como ferramentas valiosas na luta contra as graves e iminentes mudanças climáticas.

7. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, F. P. P. de. Acumulação de metais em plantas alimentícias cultivadas em solos e tecnossolos metalíferos no Quadrilátero Ferrífero. **Dissertação (Mestrado em Ecologia)** - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2022.
- AMBONATTI, L. F.. Sistema para Auxílio na Interpretação de Resultados da Análise de Solo. **Trabalho de Conclusão de Curso** - Instituto Federal de Santa Catarina. Urupema, SC. 2023.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; MARQUES, F. A.; AMARAL, A. J.; CUNHA, T. J. F.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; GALVÃO, P. V. M. Solos do Semiárido: características e estoque de carbono In: GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (ed.). Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira. Brasília, DF: **Embrapa**, cap. 6, p. 93-112, 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**, v. 220, p. 892–899, 2019.
- BARROS, Y. J.; MELO, V. DE F.; SAUTTER, K. D.; BUSCHLE, B.; DE OLIVEIRA, E. B.; DE AZEVEDO, J. C. R.; SOUZA, L. C. DE P.; KUMMER, L. Indicadores De Qualidade De Solos de área de mineração e metalurgi de chumbo. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, v. 34(1), p. 1413–1426, 2010.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil soil carbon stocks. **Soil Science Society of American Journal**, v. 66, p. 888-896, 2002.
- BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S. Interpretação dos resultados de análises de solo. CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de JM, p. 43-47. **Embrapa**. 2007.
- CALDEIRA, M. V. W., GOMES, G. S. L., GOMES, R., DUARTE, V. B. R., DE OLIVEIRA GODINHO, T., & MOREIRA, S. O. Bases trocáveis e matéria orgânica do solo em povoamento de mogno-africano. In: **Congresso Plantações Florestais**. Piracicaba, SP. 2023.
- COSTA FILHO, F. C. Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de scheelita na composição de concretos asfálticos. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

DE SOUZA, D., DE LIMA, K. C., KAPPLER, G., MODOLO, R. C. E., BREHM, F. A., & MORAES, C. A. M.. Comparação entre as propriedades de dois biocarvões, para aplicação em solo agrícola. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, São Leopoldo, RS. 2023.

DUTRA, A. S. F. Potencial fitorremediador da algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC) e percepção quanto aos riscos toxicológicos associados a rejeitos de mineração no semiárido brasileiro. **Dissertação de Mestrado**. Brasil. 2019

FABBRI, D.; PIZZOL, R.; CALZA, P.; MALANDRINO, M.; GAGGERO, E.; PADOAN, E.; AJMONE-MARSAN, F. Constructed Technosols: A Strategy toward a Circular Economy. **Applied Sciences**, v. 11, p. 3432, 2021.

GERAB, A. T. F. de S. C. Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 123, 2014.

GODEIRO, M. L. S.; BORGES Jr., J. P. B.; FERNANDES, B. R. B.; LEITE, J. Y. P. Caracterização de pré-concentrado do rejeito de scheelita da mina brejuí em concentrador centrífugo. **HOLOS**, Ano 26, v. 5, 2010.

GOMES, L. C.; FARIA, R.M.; DE SOUZA, E.; VELOSO, G.V.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FILHO, E.I.F. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, 337–350, 2019.

GOMES, R. V.; COSTA, A. F. Fertilization recommendations for the State of Pernambuco: 2nd approach. In F. J. A. Cavalcanti, et al. (Ed) **IPA/EMBRAPA/ UFRPE/UFPE**, p. 153, 2008. (In Portuguese).

HEDDE, M.; NAHMANI, J.; SÉRÉ, G.; AUCLERC, A.; CORTET, J. Early colonization of constructed Technosols by macro-invertebrates. **Journal of Soils and Sediments**. Soils Sediments, v. 19, p. 3193–3203, 2019.

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

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS). **World Soil Resources Reports**, Vienna, Austria, FAO, 2022.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15 (3), 259–263, 2006.

LINDSAY, W. L. Chemical equilibria in soils. **Blackburn Press**. 1979.

LINO, L. B. da Silva. Mineração de ferro no Brasil: conflitos ambientais e neoextrativismo. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - **Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências**. Niterói/ RJ. 2023.

LÜTZOW, M. V., KÖGEL-KNABNER, I., EKSCHMITT, K., MATZNER, E., GUGGENBERGER, G., MARSCHNER, B., FLESSA, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *Eur. J. Soil Sci*, v. 57, 426–445, 2006.

MATOS, M. S. de. Estudos da fertilidade do solo em áreas cultivadas com culturas anuais em comparação com a mata nativa. **Trabalho de Conclusão de Curso** - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. Souza, PB. 2023.

MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. M. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, 643–653, 2012.

MOREIRA, F. L. M.; MOTA, F. O. B.; CLEMENTE, C. A.; AZEVEDOS, B. M.; BOMFM, G. V. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 37, p. 7–12, 2006. (in Portuguese).

NASCIMENTO, A. R. V. J. do; NASCIMENTO, C. W. A. do; CUNHA, K. P. V. da. Solos de minas de scheelita como fontes de contaminação por metais pesados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, p. 555-556, 2020.

NEGRÃO, S.; SCHMÖCKEL, S. M.; TESTER, M. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. **Annals of Botany**, v. 119(1), p. 1–11, 2017.

OLIVEIRA, G. M.. Elaboração do plano de fechamento de mina observando os preceitos da economia circular na mineração. **Monografia (Bacharelado) - Universidade Federal de Ouro preto**. Ouro Preto, MG 2023.

PAIVA, P. B. M.. Municípios mineradores: uma análise da diversificação econômica dos municípios mineiros que mais arrecadam CFEM. **Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais** - Programa de Pós-Graduação em Fisiologia e Farmacologia. Belo Horizonte, MG, 2023.

PARRON, L. M., GARCIA, J. R., de OLIVEIRA, E. B., BROWN, G. G., & PRADO, R. B. Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília, DF : **Embrapa**, 2015.

RAMOS FILHO, R. E. B. Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manipueira com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos. **Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, RN, 2021.

REES, F.; DAGOIS, R.; DERRIEN, D.; FIORELLI, J. L.; WATTEAU, F.; MOREL, J. L.; SCHWARTZ, C.; SIMONNOT, M. O.; SÉRÉ G. Storage of carbon in constructed technosols: in situ monitoring over a decade. **Geoderma**, v. 337, 641–648, 2019.

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

RIBEIRO, E. N. M. N.; DE MORAES, M. C.; CARVALHO, A. M.. Prospecção Tecnológica do Tecnossolo Ancestral Desenvolvido a partir da Terra Preta Arqueológica. **Cadernos de Prospecção**, v. 17, n. 1, p. 274-286, 2024.

ROWLEY, M.C.; GRAND, S.; SPANGENBERG, J.E.; VERRECCHIA, E.P. Evidence linking calcium to increased organo-mineral association in soils. **Biogeochemistry**, v.153, n.3, p.223-241, 2021.

RUIZ, F.; RESMINI SARTOR, L.; DE SOUZA JÚNIOR, V. S.; CHEYSON BARROS DOS SANTOS, J.; OSÓRIO FERREIRA, T. Fast pedogenesis of tropical Technosols developed from dolomitic limestone mine spoils (SE-Brazil). **Geoderma**, v. 374, p. 114439, 2020.

SALCEDO, I. H. Biogeoquímica do fósforo em solos da região Semi-árida do NE do Brasil. **Revista Geografa**, v. 23, p.159–184, 2006. (in Portuguese).

SAMPAIO, B. D. S.. Modelagem preditiva, avaliação e valoração de serviços ecossistêmicos de estoque e sequestro de carbono na bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro. **Tese (doutorado)** - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Três Lagoas, MS. 2023.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; SILVA, F. B. R. Fertilidade de Solos do Semi-Árido do Nordeste. In J. R. Pereira, C. M. B. Faria (Eds.), **Fertilizantes: insumo básico para agricultura e combate à fome. Petrolina: Embrapa SBCS**, p. 51–71, 1995. (in Portuguese).

SCHERER, E. E. Níveis críticos de potássio para a soja em Latossolo húmico de Santa Catarina. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 22, p. 57-62, 1998.

SILVA, B. M.. Tecnossolos construídos: uma Nature Based Solution para mitigação de mudanças climáticas. **Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)** - Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. 2023.

SILVA, R. J. A. B. Pedogênese inicial de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro. **Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, 2023.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise do solo. 3 ed. Brasília: **Embrapa**. 573 p. 2017.

TEIXEIRA, R. N.. Análise do nível de *disclosure* voluntário de informações financeiras das companhias abertas do ramo de mineração no Brasil no ano de 2022. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2023.

VIAN, A. L., & TIECHER, T.. Magnésio: um macronutriente importante. **Boletim Agrônômico**. Porto Alegre, RS 2023.

WEISSERT, L. F.; SALMOND, J. A.; SCHWENDENMANN, L. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO₂ efflux across urban land use and soil cover types. **Geoderma**, v. 271, p. 80–90, 2016.

YEOMANS, J. C.; BREMMER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Nutrition**, v.19, p.1467–1476, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/0010362880936802>. Acessado em: 22 de set. de 2022.