

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

**MATHEUS JOSE GOMES DUTRA DA SILVA**

**ELEMENTOS TERRAS RARAS EM TECNOSSOLO CONSTRUÍDO  
HÁ 40 ANOS A PARTIR DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE  
SCHEELITA**

**RECIFE – PE**

**2025**

**MATHEUS JOSE GOMES DUTRA DA SILVA**

**ELEMENTOS TERRAS RARAS EM TECNOSSOLO CONSTRUÍDO  
HÁ 40 ANOS A PARTIR DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE  
SCHEELITA**

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

Co-orientadora: Laura Mariana  
Nascimento de Santana

**RECIFE – PE**

**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

S586e Silva, Matheus Jose Gomes Dutra da.  
Elementos terras raras em tecnossolo construído há 40 anos a partir de rejeitos de mineração de scheelita / Matheus Jose Gomes Dutra da Silva. - Recife, 2025.  
30 f.; il.

Orientador(a): Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva.

Co-orientador(a): Laura Mariana Nascimento de Santana.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Florestal, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Geoquímica. 2. Lantanídeos. 3. Mineração. 4. Solos antropogênicos I. Silva, Ygor Jacques Agra Bezerra da, orient. II. Santana, Laura Mariana Nascimento de, coorient. III. Título

CDD 634.9

**MATHEUS JOSE GOMES DUTRA DA SILVA**

**ELEMENTOS TERRAS RARAS EM TECNOSSOLO CONSTRUÍDO  
HÁ 40 ANOS A PARTIR DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE  
SCHEELITA**

Aprovado em: 04/07/2025

BANCA EXAMINADORA

---

Dr. Luiz Henrique Vieira Lima  
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

---

Ms. Rosilvam Ramos de Sousa  
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

---

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

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir ter forças de seguir em frente na conclusão desta etapa.

Aos meus pais, Luciene e José, por todo o apoio e investimento em mim, que me deram a vida e sempre acreditaram nos meus sonhos, me incentivaram aos estudos e nunca mediram esforços para que eu pudesse alcançar os meus objetivos. E em memória a minha avó, Maria José, que desde a minha infância, através de seus ensinamentos e incentivos, me fez desenvolver a minha curiosidade no mundo. Tenho certeza de que de lá do céu, ela está feliz com tamanha conquista.

Aos meus amigos de graduação, Thalyta Brito, Lucas Filgueira, Claudio Clementino, Giulia Ribeiro e Amanda Mendes, que foram meus pilares durante todos esses anos, amigos que a graduação me trouxe e que vou levar para a vida. E a minha grande amiga de ensino médio Jeniffer Albuquerque, que não me deixou desistir desse processo.

Agradecimento especial a minha amiga Laura Mariana, que além de uma grande parceira de jornada, é uma grande inspiração. Esse trabalho não teria sido possível sem ela. Obrigado por me estender a mão nesse momento tão importante.

Agradeço ao meu orientador Ygor Jacques, por ter me acolhido nessa etapa tão importante da graduação. Por ser um profissional que inspira a todos os que tem a oportunidade de trabalhar com ele.

Agradeço ao PET Engenharia Florestal, aos amigos que fiz durante meu tempo como petiano e em especial ao meu tutor Marcelo Nogueira, por sua relação de amizade que para além da tutoria, sempre acolheu os petianos com humanidade e nos inspirou a sermos profissionais melhores. E também aos professores Isabelle Meunier e Ricardo Gallo, que buscaram me ajudar da melhor forma com os trâmites burocráticos das oportunidades profissionais que me surgiram no final da graduação.

A todos os professores com quem tive o prazer de estudar e que de alguma forma contribuíram para meu desenvolvimento intelectual e profissional.

## RESUMO

Os elementos terras raras (ETRs) despertam interesse econômico devido à sua ampla aplicação na indústria tecnológica. Este trabalho teve como objetivo discutir a caracterização física, química e geoquímica de um tecnossolo formado há 40 anos a partir de rejeitos da mineração de scheelita na Mina Brejuí, em Currais Novos (RN). A discussão foi baseada em análises físicas, químicas, mineralógicas e determinação dos ETRs, tanto no tecnossolo quanto no rejeito recém depositado (tempo zero) para efeitos de comparação. O tecnossolo foi classificado como Spolic Technosol e apresentou um pH alcalino, presença de carbonatos e predominância de cargas negativas, condições que favorecem a retenção de cátions. Foi observada uma heterogeneidade na acidez potencial, condutividade elétrica (CE) e na capacidade de troca catiônica (CTC), além de teores moderados de carbono orgânico e baixa disponibilidade de fósforo. A avaliação mineralógica resultou em uma predominância de minerais primários como resultado da herança do rejeito de sua formação, como esmectita, biotita, caulinita, feldspatos e actinolita. Em ordem decrescente, as concentrações médias de ETRs foram respectivamente: Ce > Y > La > Nd > Sc > Dy > Pr > Er > Gd > Yb > Sm > Eu > Ho > Lu > Tb, com o  $\Sigma$ ETRs variando entre 86,65 e 151,80 mg kg<sup>-1</sup>. Os teores encontrados foram inferiores aos registrados em depósitos de outras regiões do Brasil, China e Europa, porém, ainda no Brasil, superiores aos solos do Amazonas, o que evidencia que o tecnossolo tem influência do rejeito em sua composição química. Os resultados contribuem para compreender a dinâmica dos ETRs em ambientes construídos a partir de rejeitos de mineração no semiárido nordestino, e colaboram para ações de manejo e recuperação de áreas degradadas.

**Palavras-chave:** geoquímica; lantanídeos; mineração; solos antropogênicos.

## ABSTRACT

Rare earth elements (REEs) have attracted economic interest due to their wide application in the technological industry. This study aimed to discuss the physical, chemical, and geochemical characterization of a technosol formed 40 years ago from scheelite mining waste at Mina Brejuí, in Currais Novos (RN), Brazil. The discussion was based on physical, chemical, mineralogical analyses, and REE determination, both in the technosol and in the recently deposited waste (time zero) for comparison purposes. The technosol was classified as *Spolic Technosol* and presented alkaline pH, presence of carbonates, and predominance of negative charges, conditions that favor cation retention. Heterogeneity was observed in potential acidity, electrical conductivity (EC), and also in cation exchange capacity (CEC), in addition to moderate organic carbon contents and low phosphorus availability. The mineralogical evaluation revealed a predominance of primary minerals as a result of the inheritance from the waste material, such as smectite, biotite, kaolinite, feldspar, and actinolite. In descending order, the average concentrations of REEs were respectively: Ce > Y > La > Nd > Sc > Dy > Pr > Er > Gd > Yb > Sm > Eu > Ho > Lu > Tb, with  $\Sigma$ REEs ranging from 86.65 to 151.80 mg kg<sup>-1</sup>. The concentrations found were lower than those recorded in deposits from other regions of Brazil, China, and Europe; however, still within Brazil, they were higher than in soils from the Amazon, which shows that the technosol is influenced by the waste in its chemical composition. The results contribute to understanding the dynamics of REEs in environments built from mining waste in the Brazilian semi-arid region and support management and rehabilitation actions for degraded areas.

**Keywords:** geochemistry; lanthanides; mining; anthropogenic soils.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Mapa de localização da Mina Brejuí e dos pontos de coleta: Rejeitos (Idade Zero) e Tecnossolo (40 anos).....15
- Figura 2** – Visão panorâmica da Mina Brejuí, localizada em Currais Novos, Rio Grande do Norte, vista por meio de um drone.....16
- Figura 3** – Bacia com rejeito depositado (Tempo Zero) após bombeamento de polpa.....17
- Figura 4** – Concentrações de elementos terras raras em perfil de tecnossolo originados de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro. (a) ETRLs e (b) ETRPs em tecnossolo com 40 anos.....24
- Figura 5** – Concentração média de (a) elementos terras raras leves e (b) pesados em tecnossolo com 40 anos, comparado com diferentes estudos e locais geográficos.....26

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** – Atributos físicos e químicos do tecnossolo e do rejeito original da mineração de scheelita (Santana, 2025).....23

**Tabela 2** – Concentrações médias do somatório de ETRs, ETRLs e ETRPs no tecnossolo e rejeito de mineração de scheelita (tempo zero) (Santana, 2025).....25

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TRs – Terras Raras

ETRs – Elementos Terras Raras

ETRLs – Elementos Terras Raras Leves

ETRPs - Elementos Terras Raras Pesados

CTC – Capacidade de troca de cátions

pH – Potencial Hidrogeniônico

Eh – Potencial Redox

USP – Universidade de São Paulo

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

SEDEC – Secretaria do Estado de Desenvolvimento Econômico

TFSA - Terra Fina Seca ao Ar

TFSE – Terra Fina Seca em Estufa

NBR - Norma Brasileira

ISO - Organização Internacional de Normalização

IEC - Comissão Eletrotécnica Internacional

SIG - Sistema de Informação Geográfica

WRB - Base de Referência Mundial para Recursos do Solo

IUSS - União Internacional de Ciências do Solo

CE - Condutividade elétrica

PST - Porcentagem de sódio trocável

Ds - Densidade do solo

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
2.1. Objetivo geral .....	12
2.2. Objetivos específicos.....	12
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
3.1. Conceito, classificação e geoquímica de elementos terras raras (ETRs) .....	12
3.2. Cenário de exploração de ETRs .....	13
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
4.1. Caracterização da área de estudo.....	14
4.2. Mina Brejuí.....	15
4.3. Coleta e preparo de amostras.....	17
4.4. Análises físicas e químicas dos tecnossolos .....	18
4.5. Digestão e determinação dos ETRs no rejeito e nos tecnossolos.....	19
4.6. Análises estatísticas e SIG .....	20
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>21</b>
5.1. Caracterização química, física e mineralógica dos tecnossolos .....	21
5.2. Geoquímica de ETRs no tecnossolo de 40 anos.....	24
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>27</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>27</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A atual demanda por recursos minerais impulsionada pela crescente inovação tecnológica tem destacado os Elementos Terras Raras (ETRs) como matérias-primas essenciais para a cadeia produtiva, especialmente na indústria de componentes eletrônicos (Loureiro, 2013). Esses elementos compõem um grupo de 17 elementos químicos, incluindo os 15 lantanídeos, escândio (Sc) e ítrio (Y), os quais compartilham propriedades químicas semelhantes e estão distribuídos na crosta terrestre (Santos; Trichês, 2024). Apesar de designados raros, esses elementos estão relativamente bem distribuídos na natureza, mas a forma em que se concentram torna sua exploração desafiadora e economicamente variável (Sousa Filho; Serra, 2014).

Compreender a geoquímica dos ETRs é fundamental para esclarecer os processos envolvidos na sua identificação e extração dos sítios geológicos. Essas informações são importantes para a análise da formação de tecnossolos, formados a partir de rejeitos de mineração, como resultado de modificações antrópicas intensas (Palma, 2022). Assim, estudos como o de Nascimento, Nascimento e Cunha (2020) reforçam que o conhecimento sobre a composição dos rejeitos minerais é importante para o monitoramento e diagnóstico da qualidade ambiental em áreas afetadas por mineração.

No cenário mundial, a China detém a dominância na disponibilidade e exploração de ETRs, historicamente suprindo a maior parte da demanda mundial (Sousa Filho *et al.*, 2019). Entretanto, o território brasileiro apresenta um elevado potencial de exploração com depósitos identificados em diversas regiões, sobretudo no Nordeste, onde a Província Borborema abriga formações geológicas ricas em minerais estratégicos para os ETRs (Brito Neves; Silva Filho, 2019). Dentre os estados nordestinos, o Rio Grande do Norte se destaca por seu histórico minerador, decorrente da diversidade e disponibilidade de recursos minerais, que constituem um dos pilares da economia do estado (SEDEC/RN, 2021).

Nesse contexto, destaca-se a Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos, região do Seridó potiguar, no semiárido do Rio Grande do Norte. A Mina Brejuí é considerada uma das jazidas mais relevantes da América do Sul por sua grande disponibilidade de minerais como a scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ) (Moreira, 2018). Ao longo das décadas de exploração, a atividade da mina gerou um volume significativo de rejeitos, os quais favoreceram a formação de tecnossolos (Santana, 2025). A mineração, embora essencial para fornecer matéria-prima à indústria, exige atenção aos possíveis impactos ambientais (Santos; Trichês, 2024).

A exploração de ETRs demanda processos de extração e beneficiamento complexos e resulta na geração de grandes volumes de rejeitos, que têm influência na qualidade do solo, dos recursos hídricos e da biota local, em especial em regiões semiáridas, onde a fragilidade dos ecossistemas agrava os impactos ambientais (Alves, 2007). Assim, a reutilização de rejeitos da mineração é importante para diminuir os impactos ambientais nessas áreas, diminuindo, portanto, a demanda por exploração de novos locais para extração de ETRs. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo discutir os aspectos geoquímicos e ambientais relacionados aos ETRs em tecnossolos formados por rejeitos de mineração de scheelita.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Analisar os aspectos geoquímicos associados à ocorrência de elementos terras raras (ETRs) em tecnossolos construídos a partir de rejeitos de mineração de scheelita da Mina Brejuí, localizada em Currais Novos (RN), no semiárido nordestino.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar as concentrações dos elementos terras raras presentes no tecnossolo e no rejeito de scheelita da Mina Brejuí, considerando suas classificações (ETRLs e ETRPs);
- Relacionar os dados geoquímicos do tecnossolo e do rejeito com outros locais geográficos.

## **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **3.1. Conceito, Classificação e Geoquímica de Elementos Terras Raras (ETRs)**

Os (ETRs) compõem um grupo formado por dezessete elementos químicos da tabela periódica (Duarte, 2022; Santana, 2025). Esses elementos, em sua maioria, pertencem à classe dos lantanídeos e possuem números atômicos ( $Z$ ) que variam de 57 a 71. Além disso, escândio (Sc) e ítrio (Y), que não pertencem à classe dos lantanídeos, mas compartilham de propriedades químicas bastante similares, também são considerados ETRs (Santos; Trichês, 2024). Com base nos números atômicos, os ETRs podem ser classificados como elementos terras raras leves (ETRLs), do lantânio (La) ao európio (Eu)

com  $Z = 57$  a  $63$ , e elementos terras raras pesados (ETRPs), do gadolínio (Gd) ao lutécio (Lu) com  $Z = 64$  a  $71$  (Duarte, 2022; Santana, 2025).

Apesar de denominados terras raras, estes elementos ocorrem naturalmente na crosta terrestre e estão presentes em diversos minerais (Sousa Filho; Serra, 2014). Cério (Ce) e ítrio (Y) por exemplo, são mais abundantes que elementos como arsênio (As), cobalto (Co) e chumbo (Pb), e até os lantanídeos mais escassos como túlio (Tm) e lutécio (Lu) superam as concentrações de metais como prata (Ag) (Ramos *et al.*, 2016). Por apresentarem propriedades químicas semelhantes, os ETRs são encontrados na natureza associados entre si, fazendo com que seus minerais sejam, geralmente, compostos por misturas de ETRLs ou ETRPs (Filho; Galaço; Serra, 2019).

Muitos autores têm analisado os processos geoquímicos responsáveis por regular as concentrações de ETRs nos solos (Alfaro *et al.*, 2018). Segundo Panahi *et al.* (2000), esses elementos durante o processo de intemperismo podem ser adsorvidos pela fração coloidal, incorporados por substituição isomórfica ou perdidos por meio da lixiviação. Fatores como a granulometria, mineralogia da fração argilosa, teor de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC), variações de pH e Eh, além da presença de óxidos de ferro e manganês, condicionam a mobilização, redistribuição e o fracionamento dos ETRs no solo (Jowitt *et al.*, 2017; Laveuf; Cornu, 2009; Tyler, 2004). Sendo assim, o comportamento geoquímico desses elementos pode diferir de acordo com as particularidades de cada ambiente (Sharma; Rajamani, 2000).

### **3.2 Cenário de exploração de ETRs**

De acordo com Sousa Filho *et al.* (2019), em termos de óxidos, estima-se que as reservas de terras raras (TRs) ao redor do planeta concentram cerca de 132 milhões de toneladas disponíveis na crosta terrestre, sendo o território da China detentor de aproximadamente um terço desse valor. Países como Vietnã, Rússia e Brasil também possuem reservas expressivas, porém a China continua sendo a principal responsável pela extração e fornecimento em larga escala de TRs.

No Brasil, segundo o Jornal da Universidade de São Paulo – USP (2023), no contexto geológico, os ETRs estão presentes em depósitos de areias monazíticas encontrados no litoral e, com maior frequência, em áreas associadas a antigos vulcões extintos. A exploração de TRs para fins comerciais em território brasileiro foi impulsionada pelos avanços industriais do século XX, sobretudo, entre as décadas de 1950 e 1960, quando a participação de instituições importantes como a Companhia de Pesquisas de

Recursos Minerais (CPRM) alavancou os levantamentos geológicos que posicionaram o país como um potencial protagonista na exploração de TRs (Santos; Trichês, 2024).

A aplicação dos ETRs na indústria se destaca pela relevância tecnológica, a exemplo da produção de ímãs permanentes de alto desempenho utilizados em turbinas eólicas e motores elétricos, e ímãs compostos por Nd, Pr e Dy. De acordo com Silva Junior e Campos (2016), estes elementos são essenciais para turbinas de grande porte por permitirem maior densidade magnética com menor volume e peso, aumentando a eficiência dos sistemas que as utilizam. Por esse motivo, também resultam em motores elétricos mais eficientes que podem ser fabricados a partir desses materiais.

Esta ampla possibilidade de aplicações evidencia o papel central dos ETRs na indústria moderna, o que os posiciona como matérias-primas críticas para a inovação tecnológica global (Formoso, 2016). Elementos como Eu e Tb são empregados na fabricação de fósforos luminescentes, utilizados em lâmpadas fluorescentes e telas eletrônicas. O La, por sua vez, é amplamente utilizado como catalisador no refino de petróleo sendo consumido em grandes quantidades por empresas como a Petrobras, demonstrando que os ETRs são economicamente essenciais (Silva Junior; Campos, 2016).

Nesse contexto, o setor de mineração é bastante relevante no fornecimento de matérias-primas para a indústria. Entretanto, nos sítios mineralógicos, observa-se uma redução progressiva na concentração de minério por unidade de área explorada, o que resulta em uma maior complexidade nas operações de extração desses elementos e associa um aumento expressivo na geração de rejeitos (Torquato, 2022). Extrair minerais portadores de elementos terras raras envolve riscos ao meio ambiente, como a geração de resíduos potencialmente tóxicos e a contaminação ambiental, especialmente do solo e dos recursos hídricos (Santos; Trichês, 2024).

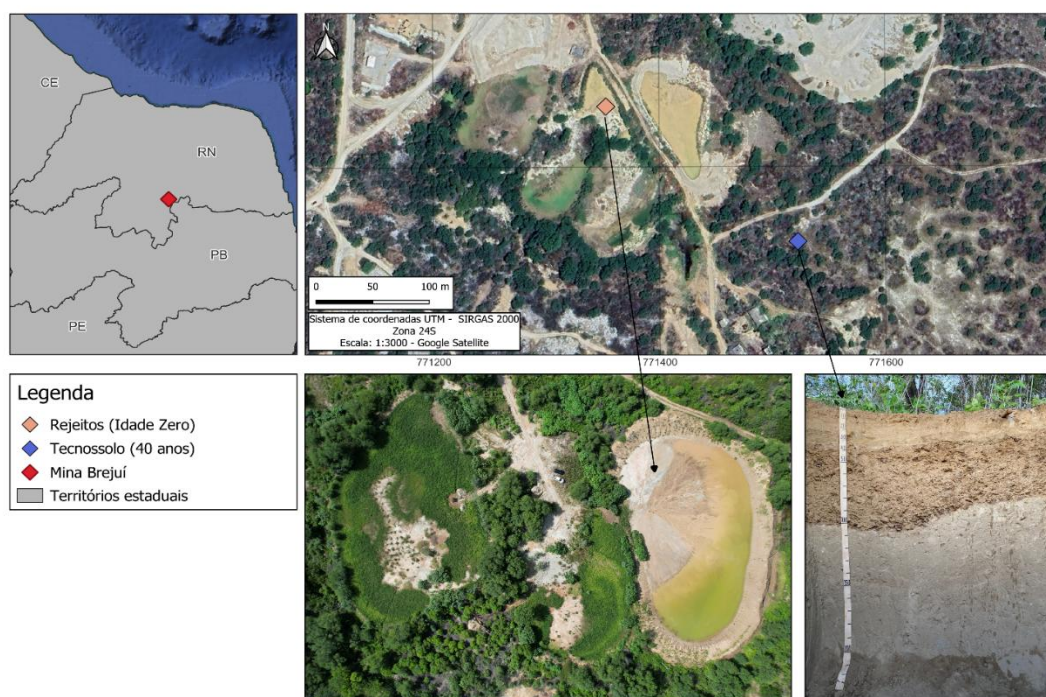
## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização da área de estudo**

O estudo foi realizado na Mina Brejuí, no município de Currais Novos, que está localizado na região do Seridó Potiguar e ocupa uma área de aproximadamente 864.349 km<sup>2</sup> no semiárido nordestino, possuindo uma população estimada em 42.930 habitantes (IBGE, 2022). O município é marcado por um clima semiárido quente e seco, com distribuição de chuvas irregular e temperaturas médias de 27,5 °C (Santos, 2024). As altitudes médias variam de 400 a 500 metros e a vegetação de caatinga é fortemente antropizada devido à ocupação humana, especialmente voltada à agropecuária (Medeiros;

Oliveira, 2011). Segundo Nascimento, Nascimento e Cunha (2020), os solos são, em sua maioria, neossolos litólicos, rasos e com baixa capacidade de retenção de água, o que influencia na dinâmica dos rejeitos minerários e a formação de tecnossolos. Nesse estudo, as áreas de interesse foram divididas entre Rejeitos (Idade Zero) e Tecnossolo (40 anos) (Figura 1).

**Figura 1** – Mapa de localização da Mina Brejuí e dos pontos de coleta: Rejeitos (Idade Zero) e Tecnossolo (40 anos).



Fonte: autoral.

#### 4.2. Mina Brejuí

Na região Nordeste, a Província Borborema é uma das principais unidades geotectônicas brasileiras, com registros de múltiplos eventos orogênicos e intrusivos (Brito Neves; Silva Filho, 2019). A província da Borborema abrange estados da região Nordeste, dentre eles, o Rio Grande do Norte, onde, segundo a Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico (SEDEC/RN, 2021), a atividade de mineração é significativa no desenvolvimento econômico do estado. Sua expressiva variedade mineral posiciona o estado como um dos maiores produtores nacionais de sal marinho e scheelita, além de ocupar um papel de destaque na extração de recursos naturais energéticos como petróleo e gás natural (Silva, 2018).

A Mina Brejuí (6°19'19"S, 36°32'52"O), segundo o Serviço Geológico do Brasil (2023), possui grande concentração de minérios como ouro, scheelita, molibdênio, bismuto, cobre e ferro. A mina (Figura 2) é uma das mais significativas jazidas de scheelita da América do Sul, fundada em 1943 por Tomaz Salustino. A descoberta do minério ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, momento em que o tungstênio, extraído da scheelita, teve grande valorização devido à sua aplicação na indústria bélica (Moreira, 2018).

**Figura 2** – Visão panorâmica da Mina Brejuí, localizada em Currais Novos, Rio Grande do Norte, vista por meio de um drone.



Fonte: autoral.

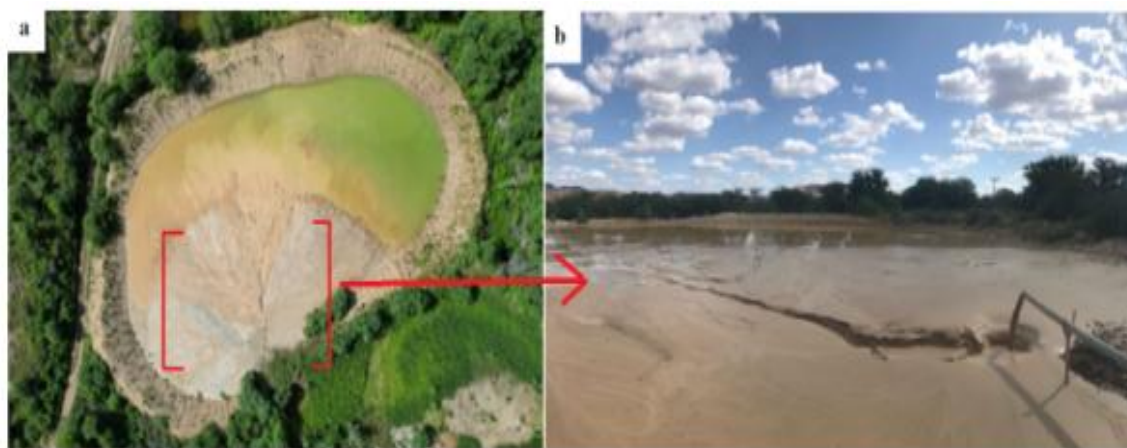
A extração da scheelita na Mina Brejuí é feita por meio de lavra subterrânea, com uma rede complexa de galerias que se estende por cerca de 65 km de túneis de até 900 metros de profundidade (Gerab, 2014). O processo de extração tem início com a detonação e transporte do material até a superfície, onde o minério é submetido às etapas de fragmentação e concentração, com o objetivo de alcançar um teor comercial viável.

A etapa inicial do beneficiamento é a cominuição, britagem e moagem. A partir disso, por meio da diferença de densidade entre a scheelita e os demais minerais presentes na matriz rochosa, são aplicadas técnicas de separação gravimétrica, utilizando equipamentos como jigues e mesas concentradoras. O minério então passa pelo processo de ustulação para que seja purificado e, na sequência, é submetido à separação magnética para obter o produto final. Um aspecto importante é que, durante todo o processo de

concentração do tungstênio contido na scheelita, não se utilizam reagentes químicos, o que aumenta a complexidade de todo o processo (Ramos Filho, 2021).

A seleção das áreas destinadas à deposição dos rejeitos prioriza as zonas mais profundas para aumentar a capacidade, de acordo com Santana (2025). As bacias de contenção (Figura 3) são feitas com equipamentos como escavadeiras hidráulicas e tratores de esteira que moldam o próprio solo do local, sendo compactadas pelo peso das máquinas, resultando em bacias que apresentam cerca de cinco metros de profundidade. A condução dos rejeitos até as bacias é feita por meio do bombeamento da polpa, que após a deposição, se sedimenta ao longo do tempo formando os tecnossolos (Santana, 2025).

**Figura 3** – Bacia com rejeito depositado (Tempo Zero) após bombeamento de polpa.



Fonte: autoral.

É realizada a construção de uma nova bacia quando a anterior atinge cerca de 80% do seu limite, formando tecnossolos novos. Estima-se que durante o beneficiamento de scheelita, apenas 0,8% do total do minério extraído seja aproveitado comercialmente, enquanto os 99,2% restantes se tornam rejeitos. Esse baixo rendimento resulta na geração de grandes volumes de rejeitos, totalizando cerca de 6,5 milhões de toneladas, compostas por frações finas e grossas (Ramos Filho, 2021).

### 4.3. Coleta e preparo de amostras

Foram selecionados perfis de tecnossolos com base em imagens de satélite disponibilizadas pelo Google Earth, aliadas a informações técnicas fornecidas por engenheiros da Mina Brejuí. A partir dessas fontes, foi selecionado o tecnossolo desenvolvido a partir de rejeitos da mineração de scheelita com 40 anos de deposição e

evolução. Para efeitos de comparação, também foi realizada a coleta de material correspondente ao rejeito recém depositado (tempo zero).

Usando as diretrizes estabelecidas pela Base de Referência Mundial para Recursos do Solo (WRB, 2022), as amostras deformadas e não deformadas foram coletadas de diferentes horizontes para realização das análises físicas, químicas e mineralógicas. Para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), as amostras foram secas ao ar, destorroadas, quarteadas e peneiradas em malha de 2 mm.

Ainda em campo, foram observadas grandes quantidades de carbonatos no perfil e seus horizontes, exigindo cuidados adicionais para que não houvesse interferência nos resultados das análises. Para isso, foi realizado um pré-tratamento para a remoção desses carbonatos, submetendo 100 g de solo de cada amostra à ação de uma solução diluída de ácido clorídrico (HCl 1:10). Foi observada a ação da efervescência. As amostras foram vedadas hermeticamente e deixadas em repouso por um período de 12 horas, e o processo foi repetido sucessivamente até que não houvesse reação de efervescência. Em seguida, as amostras foram lavadas com álcool 60% para a remoção de resíduos de cloretos, conforme a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017), para garantir a qualidade e a confiabilidade das análises seguintes.

#### **4.4. Análises físicas e químicas dos tecnossolos**

A determinação do pH do solo foi realizada utilizando água destilada e cloreto de potássio (KCl) a 1 mol L<sup>-1</sup>, com a razão 1:2,5 entre solo e solução. Também foi preparada a pasta de saturação para medir o pH e a condutividade elétrica (CE), seguindo os procedimentos estabelecidos por Teixeira *et al.* (2017). Os teores dos cátions trocáveis potássio (K<sup>+</sup>) e sódio (Na<sup>+</sup>) foram obtidos por meio da extração com solução Mehlich-1, utilizando a proporção de 1:10 entre solo e extrator. A determinação da concentração desses elementos foi realizada por fotometria de chama. A determinação do fósforo (P) disponível foi realizada com base no método de Olsen Sommers (1982), que descreve essa metodologia para solos de pH alcalino ou com presença de carbonatos.

O cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e o magnésio (Mg<sup>2+</sup>) foram extraídos com solução de KCl a 1 mol L<sup>-1</sup>, na proporção 1:10 (solo:solução), e foram determinados por espectrometria de absorção atômica, de acordo com a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017). A acidez potencial, representada pela soma de íons H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup>, foi determinada com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH 7,0. A partir desses resultados, foram calculados

atributos químicos como a soma de bases (SB), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), capacidade de troca de cátions total (T) e capacidade de troca efetiva (t).

A determinação de Carbono Orgânico Total (COT) foi realizada com base no método de Walkley-Black modificado, assim como descrito por Yeomans e Bremner (1988). Cerca de 20 g de terra fina seca em estufa (TFSE) foram moídos manualmente e peneirados em malha de 80 mesh. Na sequência, 0,5 g da amostra foi misturada com 10 mL de solução de dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ )  $0,0667 \text{ mol L}^{-1}$ , acondicionada em um Erlenmeyer de 250 mL. A mistura foi aquecida em chapa metálica e posteriormente titulada para obter a determinação do teor de carbono (Santana, 2025).

A análise granulométrica da TFSA foi conduzida por meio do método do densímetro que, segundo a lei de Stokes, funciona pela sedimentação das partículas. Foi utilizado um agitador do tipo Wagner operando por 16 horas contínuas e um agente dispersante (hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio). A fração areia total foi separada por peneiramento em malha de 0,053 mm, e logo após a secagem, foram utilizadas peneiras com abertura de 0,2 mm para separar em frações areia fina e grossa. As frações de argila e silte foram separadas de acordo com os tempos de sedimentação previstos pela lei de Stokes. Após a etapa de sifonagem, a argila foi seca em estufa a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  e em seguida, triturada em almofariz de ágata, peneirada em malha de 80 mesh e armazenada. De acordo com Santana (2025), a fração de silte foi obtida por diferença calculada pela subtração dos valores das demais frações granulométricas. A densidade do solo foi determinada utilizando o método do anel volumétrico nos perfis de solo, de acordo com Teixeira *et al.* (2017).

#### **4.5. Digestão e determinação dos ETRs no rejeito e nos tecnossolos**

As análises das concentrações totais ETRs foram realizadas a partir da digestão ácida, seguindo a metodologia descrita por Alvarez *et al.* (2001). Foram pesados 0,5 g da amostra em béqueres de Teflon. A digestão foi realizada utilizando uma mistura de ácidos composta por 10 mL de ácido fluorídrico (HF), 10 mL de ácido nítrico ( $HNO_3$ ), 5 mL de ácido perclórico ( $HClO_4$ ) e 5 mL de ácido clorídrico (HCl) (Santana, 2025).

Inicialmente, foi adicionado 10 mL de HF ao material no béquer com o objetivo de homogeneizar a solução. Após 1 noite de repouso em placas de Petri, foi adicionado 5 mL de  $HNO_3$  concentrado a fim de realizar uma nova homogeneização. A solução foi então levada à chapa aquecedora a  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  até secar completamente e sem que ocorresse carbonização. Foram acrescentados mais 5 mL de  $HNO_3$  e 5 mL de  $HClO_4$  e o béquer foi

coberto com vidro de relógio, permanecendo sob refluxo na chapa até que a digestão das partículas ocorresse. Após isso, o béquer foi retirado da chapa, destampado, e o vidro de relógio foi cuidadosamente lavado com água ultrapura proveniente do sistema Direct-Q da Millipore, onde o líquido da lavagem foi coletado de volta ao béquer (Santana, 2025). A amostra foi submetida a um novo aquecimento a 250 °C, até a liberação de vapor denso, o que indica a eliminação de gases. Após redução, quando observada uma massa viscosa e sem sinais de carbonização, a amostra foi resfriada à temperatura ambiente. Se observadas partículas não digeridas, o processo de digestão era reiniciado (Santana, 2025).

Foram adicionados 5 mL de HCl e 5 mL de água ultrapura ao resíduo final, e em seguida, este foi novamente aquecido. A solução foi retirada da chapa para resfriamento e em seguida transferida para balões volumétricos certificados de 25 mL, conforme a norma NBR ISO/IEC (Santana, 2025). A solução foi filtrada com papel de filtro lento (Macherey Nagel®) e ajustou-se o volume final com água ultrapura (Sistema Direct-Q 3 da Millipore). Todas as digestões foram realizadas em duplicata.

As concentrações dos elementos lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), samário (Sm), európio (Eu), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb), lutécio (Lu), além de ítrio (Y) e escândio (Sc) nas amostras de rejeitos (tempo zero) e tecnossolo foram quantificadas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), equipamento modelo Optima 7000, da Perkin Elmer. Nesse caso, as amostras foram introduzidas por meio de um amostrador automático AS 90 Plus. A operação do equipamento se dá por observação dupla (axial e radial), e é equipado com detector de estado sólido (Santana, 2025).

Foi utilizada a amostra certificada de solo SRM 2709 — San Joaquin Soil (Baseline Trace Element Concentrations), fornecida pelo National Institute of Standards and Technology (NIST, 2002) para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados analíticos. As curvas de calibração foram elaboradas a partir de padrões com concentração de 1000 mg L<sup>-1</sup> (TITRISOL®, Merck) devidamente diluídas em água ultrapura. Os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) das curvas obtidas foram superiores a 0,99, e quando o desvio entre replicatas ultrapassasse 10%, uma nova calibração do equipamento era realizada e as amostras eram reprocessadas (Santana, 2025).

#### **4.6. Análises estatísticas e SIG**

Os dados estatísticos foram obtidos por meio de análise univariada, na qual foram calculadas medidas estatísticas descritivas como desvio padrão, média, mediana e valores mínimos e máximos. Para fins de informação geográfica, foram utilizados delineamentos amostrais entre as amostras, considerando os espaçamentos de 7 x 10m (70m<sup>2</sup>) para o perfil de 40 anos (Santana, 2025).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Caracterização química, física e mineralógica dos tecnossolos**

O perfil de tecnossolo foi analisado em comparação com material de rejeito recém depositado (tempo zero – T0), e classificado segundo a WRB (IUSS Working Group WRB, 2022), como Spolic Technosol (SANTANA, 2025).

A análise de pH demonstrou que os valores medidos em água foram superiores aos obtidos com KCl, resultando em um  $\Delta$ pH negativo, variando de -0,4 a -1,3 (Tabela 1), diferença que revela o predomínio de cargas negativas, favorecendo a retenção de cátions em relação aos ânions. Foi constatado que, em água, o valor médio de pH foi de 8,72, resultado que confirma a presença de carbonatos no material de origem e evidencia um ambiente alcalino. Houve diferenças significativas nos atributos químicos e físicos no perfil. Foi observada uma tendência de aumento da acidez potencial, especialmente nos horizontes Auk. Ainda foi constatada que a CTC apresentou ampla variação, de 9,74 a 35,34 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Santana, 2025).

Em relação à CE, houve alterações de acordo com a profundidade, com distribuição heterogênea observada pela variação de 0,53 a 6,11 dS m<sup>-1</sup>. A porcentagem de sódio trocável (PST) se comportou de forma semelhante, com valores entre 1,47 e 5,25%. Os resultados indicaram que o horizonte 3Cuk apresentou caráter salino, com CE > 4 dS m<sup>-1</sup> e PST < 15% (Santana, 2025).

A maior concentração de P, determinada pelo método de Olsen, atingiu seu máximo no horizonte Auk, com 12,11 mg kg<sup>-1</sup>, diminuindo com a profundidade até atingir valores próximos de 0,05 mg kg<sup>-1</sup>, e evidenciando uma limitação do tecnossolo para a fertilidade em relação a este nutriente (Santana, 2025). As análises ainda demonstraram que os teores de carbono total variaram com intervalos de 1,09 a 3,73 g kg<sup>-1</sup> e a densidade do solo (Ds) oscilou entre 1,47 e 1,81 kg dm<sup>-3</sup> (Santana, 2025).

O rejeito recém exposto (T0) apresentou pH alcalino, com valor de 8,79, similar ao do tecnossolo já formado, com teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> de 5,29, 1,35 e 0,05 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Os valores de CE e PST ficaram abaixo dos limites críticos para

salinidade ( $CE < 4 \text{ Ds m}^{-1}$  e  $PST < 15\%$ ) e o fósforo disponível foi considerado baixo (Santana, 2025).

A avaliação mineralógica exibiu grande ocorrência de minerais primários, sendo a fração argila composta por esmectita, biotita, caulinita, goethita e feldspatos. Na fração areia, foram constatados feldspatos, biotita, talco, quartzo e actinolita que, embora sem grandes variações, indicam uma estabilidade mineralógica no tecnossolo, que, segundo Santana (2025), é influenciada pelos rejeitos de mineração de scheelita.

**Tabela 1** – Atributos físicos e químicos do tecnossolo e do rejeito original da mineração de scheelita (Santana, 2025).

Horiz./ Prof. (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	ΔpH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H+Al	CTC	CE (dS m <sup>-1</sup> )	PST (%)	P (Olsen) (mg kg <sup>-1</sup> )	Cinor	Corg	COT	Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	Areia Total	Silte	Arg
<b>Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic)</b>																			
<b>Auk (0 – 10)</b>	8,31	7,69	-0,6	6,63	1,51	0,36	0,43	3,08	11,65	1,04	4,00	12,11	0,55	1,76	2,31	1,47	576	354	71
<b>Cuk1 (11 – 23)</b>	9,17	7,91	-1,3	4,90	1,44	0,37	0,41	2,99	9,74	0,58	5,25	1,26	1,14	0,29	1,43	1,59	863	42	96
<b>Cuk2 (23 – 33)</b>	9,03	7,88	-1,2	7,35	1,55	0,19	0,11	2,24	11,25	0,53	2,04	0,40	3,16	0,05	3,21	1,81	716	135	149
<b>2Cuk1/ Cuk2 (33-38)</b>	8,73	7,33	-1,4	25,68	7,23	0,49	0,13	2,30	35,34	0,94	1,47	0,05	0,86	0,23	1,09	1,73	349	264	387
<b>3Cuk (88-150+)</b>	8,38	8,00	-0,4	6,99	2,04	0,37	0,09	2,39	11,51	6,11	3,87	0,19	3,71	0,03	3,73	1,64	744	135	121
<b>T0</b>	8,79	8,31	-0,5	5,29	1,35	0,22	0,05	1,32	8,01	3,16	3,12	0,44	3,20	0,01	3,22	-	0	830	170

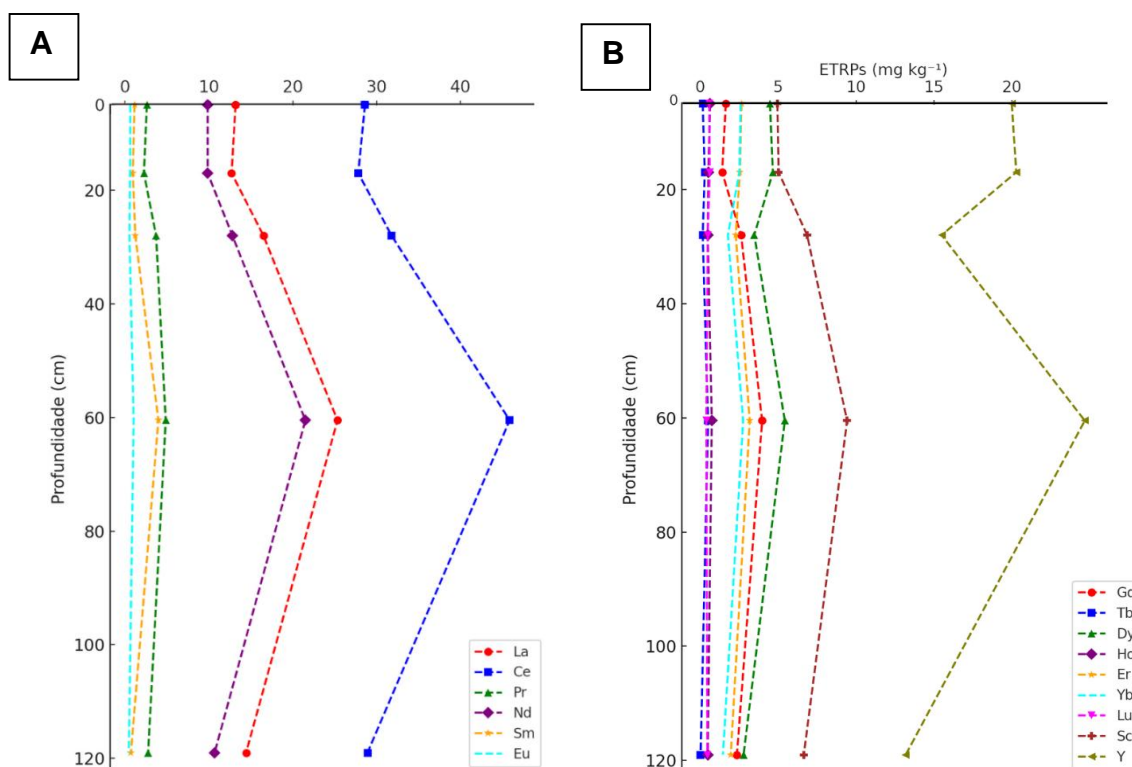
(Horiz.) – Horizonte; (Prof.) – Profundidade; (CTC) – Capacidade de troca de cátions; (CE) – Condutividade elétrica; (PST) – Porcentagem de sódio trocável; (Cinor) – Carbono Inorgânico; (Corg) – Carbono Orgânico; (COT) – Carbono Total; (Ds) – Densidade do solo; (Arg) – Argila.

## 5.2. Geoquímica de ETRs no tecnossolo de 40 anos

O tecnossolo com 40 anos de formação indicou as seguintes concentrações médias de ETRs: Ce ( $32,61 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Y ( $17,78 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > La ( $16,45 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Nd ( $12,96 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Sc ( $6,32 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Dy ( $4,03 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Pr ( $3,26 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Er ( $2,48 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Gd ( $2,37 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Yb ( $2,20 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Sm ( $1,62 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Eu ( $0,67 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Ho ( $0,64 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Lu ( $0,58 \text{ mg kg}^{-1}$ ) > Tb ( $0,32 \text{ mg kg}^{-1}$ ), sendo as concentrações de Tm não identificadas (Figura 4). As concentrações de Pm não foram identificadas por se tratar de um elemento que não costuma ocorrer naturalmente.

Entre os ETRLs, destacaram-se com maiores concentrações, La, variando de 12,73 a 25,35  $\text{mg kg}^{-1}$ , e Ce, variando de 27,83 a 45,88  $\text{mg kg}^{-1}$  (Figura 4a). Pr e Nd foram os elementos que apresentaram teores intermediários, de 2,28 a 4,88  $\text{mg kg}^{-1}$  e de 9,88 a 21,53  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente (Figura 4a). Os menos abundantes foram Sm e Eu, que variaram, respectivamente, entre 0,73 e 4,00  $\text{mg kg}^{-1}$  e de 0,48 a 1,05  $\text{mg kg}^{-1}$  (Figura 4a). Santana (2025) também constatou que as maiores concentrações de ETRLs foram nos horizontes 2Cuk1/Cuk2, onde foram observadas as maiores proporções de argila (Tabela 1).

**Figura 4** – Concentrações de elementos terras raras em perfil de tecnossolo originado há 40 anos a partir de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro. (a) ETRLs e (b) ETRPs.



Fonte: autoral.

Sobre os ETRPs, foram observadas maiores concentrações de Y e Sc, com teores respectivos de 12,55 a 23,40 mg kg<sup>-1</sup> e de 4,78 a 9,00 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 4b) (Santana, 2025). Dy, Gd, Er e Yb apresentaram as seguintes concentrações: 2,73 a 5,23 mg kg<sup>-1</sup>, 1,43 a 3,85 mg kg<sup>-1</sup>, 1,95 a 3,10 mg kg<sup>-1</sup> e 1,48 a 2,70 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 4b). Ho, Lu e Tb apresentaram as menores concentrações, variando respectivamente de 0,55 a 0,80 mg kg<sup>-1</sup>, de 0,48 a 0,68 mg kg<sup>-1</sup> e de 0,13 a 0,58 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 4b). Nesse sentido, as maiores concentrações de ETRPs, exceto Lu, foram observadas no horizonte 2Cuk1/Cuk2.

A soma total dos ETRs foi variável, com valores entre 86,65 e 151,80 mg kg<sup>-1</sup> e uma média de 104,26 mg kg<sup>-1</sup>, sendo os maiores valores observados no horizonte 2Cuk1/Cuk2 (Tabela 2). O  $\Sigma$ ETRLs variou entre 54,28 e 102,68 mg kg<sup>-1</sup>, com uma média de 67,56 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 2). O  $\Sigma$ ETRPs apresentou resultados que variaram entre 28,60 e 49,13 mg kg<sup>-1</sup>, com uma média de 36,70 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 2). O tempo zero, por sua vez, apresentou  $\Sigma$ ETRs de 112,57 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 2).

**Tabela 2** – Concentrações médias (mg kg<sup>-1</sup>) do somatório de ETRs, ETRLs e ETRPs no tecnossolo e rejeito de mineração de scheelita (tempo zero) (Santana, 2025).

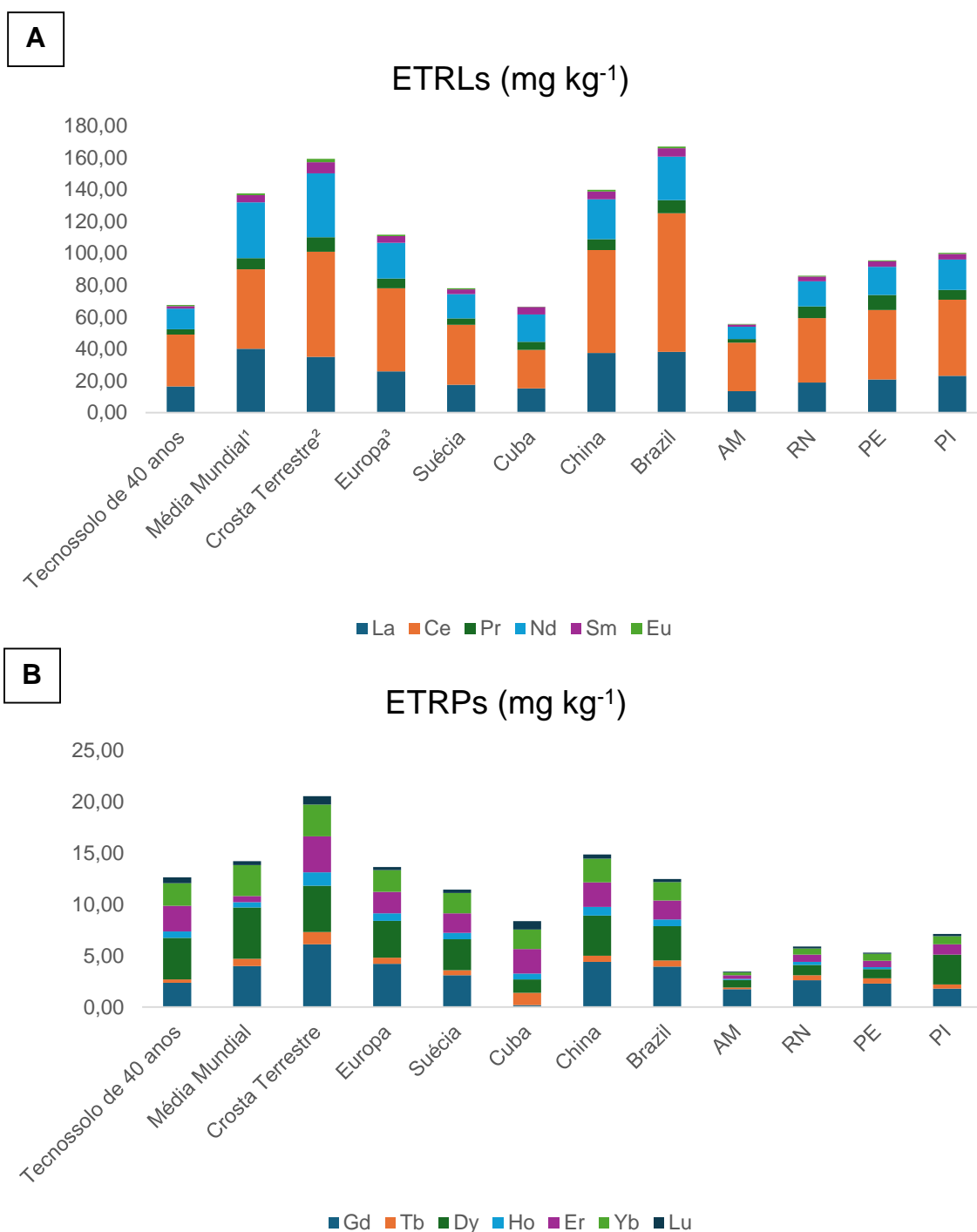
Horizonte/Profundidade (cm)	$\Sigma$ ETRs	$\Sigma$ ETRLs	$\Sigma$ ETRPs
<b>Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic)</b>			
<b>Auk (0-10)</b>	92,60	56,13	36,48
<b>Cuk1 (11-23)</b>	90,93	54,28	36,65
<b>Cuk2 (23 – 33)</b>	99,30	66,68	32,63
<b>2Cuk1/Cuk2 (33-88)</b>	151,80	102,68	49,13
<b>3Cuk (88-150+)</b>	86,65	58,05	28,60
<b>Média</b>	104,25	67,56	36,69
<b>Tempo Zero</b>			
<b>T0</b>	112,57	73,51	39,06

Em 40 anos de formação, as concentrações médias de ETRLs no tecnossolo se mostraram inferiores às observadas na crosta terrestre, Europa, China e Brasil, sobretudo nos estados do Rio Grande do Norte (RN), Pernambuco (PE) e Piauí (PI) (Figura 5a). Ainda assim, os valores observados foram superiores aos dos solos do Amazonas (AM) (Figura 5a), resultados que representam a composição química dos materiais de origem que se formam pelos rejeitos da mineração de scheelita (Santana, 2025).

Com relação aos ETRPs, as concentrações se mostraram inferiores às observadas na crosta terrestre, Europa, China e na média mundial (Figura 5b). Ainda assim, foram equivalentes ou superiores aos dos solos de regiões como Suécia, Cuba e Brasil, sobretudo nos estados do Amazonas (AM), Rio Grande do Norte (RN), Pernambuco (PE) e Piauí (PI)

(Figura 5b). Essas variações de distribuição de ETRLs e ETRPs reforçam a relevância da composição dos materiais de origem sobre os processos pedogenéticos, ao se avaliar o comportamento geoquímico dos ETRs nos tecnossolos (Santana, 2025).

**Figura 5** – Concentração média de (a) elementos terras raras leves e (b) pesados em tecnossolo com 40 anos, comparado com diferentes estudos e locais geográficos.



Fonte: autoral.

## 6. CONCLUSÕES

A análise do tecnossolo com 40 anos de idade, formado a partir de rejeitos da mineração de scheelita na Mina Brejuí, demonstra que suas características físicas e químicas ainda mantêm semelhanças com o material de origem. As concentrações de ETRs mostram que o tecnossolo formado na Mina Brejuí apresenta uma retenção em subsuperfície desses ETRs, corroborando as maiores proporções de argila. Do ponto de vista ambiental, esses resultados reforçam a importância dos estudos sobre a geoquímica dos ETRs nesses ambientes geográficos, uma vez que contribuem para traçar estratégias de gestão e de recuperação de áreas degradadas através de informações pertinentes sobre o potencial impacto ambiental e as possibilidades de manejo dos rejeitos de mineração.

## REFERENCIAS

ALFARO, M. R.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M., SILVA, Y. J. A. B., SILVA, Y. J. A. B.; ACCIOLY, A. M. A.; MONTERO, A.; UGARTE, O. M.; ESTEVEZ, J. Rareearthelement geochemistry in soils developed in different geological settings of Cuba. *Catena*, v. 162, p. 317-324, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.031>

ALVAREZ, J. R. E.; MONTERO, A. A.; JIMÉNEZ, N. H.; MUÑIZ, U. O.; PADILLA, A. R.; MOLINA, R. J.; VERA, S. Q. de. Nuclear and related analytical methods applied to the determination Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in a red ferralitic soil and Sorghum samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 247, n. 3, p. 479-486, 2001.

<https://doi.org/10.1023/A:1010640009301>

ALVES, Jose Jakson. Geocologia da caatinga no semi-árido do Nordeste brasileiro. *CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem*, v. 2, n. 1, 2007.

BRITO NEVES, Benjamim Bley de; SILVA FILHO, Adejardo Francisco da. Superterreno Pernambuco-Alagoas (PEAL) na Província Borborema: ensaio de regionalização tectônica. *Geologia USP. Série Científica*, v. 19, n. 2, p. 3-28, 2019.

DUARTE, Ana Carolina Oliveira et al. Elementos terras raras nas características anatômicas, nutricionais e fotossintéticas de *Pistia stratiotes*. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais*, v. 17, n. 1, p. 219-236, 2022.

FILHO, P. C. S.; GALAÇO, A. R. B. S.; SERRA, O. A. Terras raras: tabela periódica, descobrimento, exploração no Brasil e aplicações. *Química Nova*, v. 42, n. 10, 2019.

<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170438>

FORMOSO, Milton Luiz Laquintinie et al. Os elementos terras raras e sua importância para o setor mineral do Brasil. In: MELFI, Adolpho José et al. (orgs.). *Recursos Minerais*

**no Brasil: problemas e desafios.** Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p. 68.

GERAB, A. T. F. 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, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Currais Novos (RN). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rn/currais-novos.html>. Acesso em: 14 maio 2025.

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.

JORNAL DA USP. Valiosas e versáteis: pesquisas com terras raras mostram caminho para criar cadeia produtiva no Brasil. 14 set. 2023.

JOWITT, S. M.; WONG, V. N. L.; WILSON, S. A.; GORE, O. Critical metals in the critical zone: controls, resources and future prospectivity of regolith-hosted rare earth elements. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 64, n. 8, p. 1045-1054, 2017.

<https://doi.org/10.1080/08120099.2017.1380701>

LAVEUF, C.; CORNU, S. A. Review on the potentiality of rare earth elements to trace pedogenetic processes. **Geoderma**, v. 154, p. 1-12, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.10.002>

LOUREIRO, Francisco Eduardo Lapido et al. **O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras.** CETEM/MCTI, 2013.

MEDEIROS, W. D. A.; OLIVEIRA, F. F. G. Geodiversidade, Geopatrimônio e Geoturismo em Currais Novos, NE do Brasil. *Mercator* (Fortaleza), v. 10, n. 23, p. 59–69, set./dez. 2011. DOI: 10.4215/RM2011.1023.0005.

MOREIRA, Gabriel Luídy. A exploração do minério Scheelita: estudo de caso: Mina Brejuí-Currais Novos-RN. 2018.

NASCIMENTO, Alana Rayza Vidal Jerônimo do; NASCIMENTO, Clístenes Williams Araújo do; CUNHA, Karina Patrícia Vieira da. Solos de minas de scheelita como fontes de contaminação por metais pesados. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, n. 04, p. 555-556, 2020.

NIST - National Institute of Standards and Technology. Standard Reference Materials - SRM 2709, p. 2710-2711, 2002.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E. Phosphorus. In: Page, A. L. (ed.) *Methods of soil analysis, chemical and microbiological properties*. Madison: Soil Science Society of America, v. 430, 1982.

PALMA, Heitor Paiva. *Recuperação variável dos tecnossolos do rejeito da barragem de fundão sob diferentes coberturas vegetais*. 2022.

PANAHI, A.; YOUNG, G. M.; RAINBIRD, R. H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archaean granite near Ville Marie, Quebec, Canada. ***Geochimica et Cosmochimica Acta***, v. 64, 2000

RAMOS, Silvio J. et al. Rare earth elements in the soil environment. ***Current Pollution Reports***, v. 2, p. 28-50, 2016.

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) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

RIO GRANDE DO NORTE. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico. *Mineração*. 2021.

SANTANA, Laura Mariana Nascimento de. *Variabilidade espacial e temporal de elementos terras raras em tecnossolos construídos a partir de rejeitos de mineração de scheelita no semiárido brasileiro*. 2025. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2025.

SANTOS, Anderson da Silva. ***Risco hidrológico associado com as unidades de paisagem no município de Currais Novos-RN, semiárido brasileiro***. 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SANTOS, Luciano da Costa; TRICHÊS, Daniela Menegon. Exploração e prospecção de terras raras no Brasil: História e desafios. ***LUMEN ET VIRTUS***, v. 15, n. 40, p. 4150-4162, 2024.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto na Província Mineral do Seridó identifica depósitos de ouro, scheelita, molibdênio, bismuto, cobre e ferro. 14 jun. 2023.

SHARMA, A.; RAJAMANI, V. Major Element, REE, and Other Trace Element Behavior in Amphibolite Weathering under Semiarid Conditions in Southern India. ***The Journal of Geology***, v. 108, n. 4, p. 487-496, 2000.

<https://doi.org/10.1086/314409>

SILVA JÚNIOR, Amilton Ferreira; CAMPOS, Marcos Flávio de. Relevância das terras raras para o setor energético. *Holos*, v. 1, p. 350-363, 2016.

SILVA, Cinthia Maria Cordeiro Atanázio Cruz. TEOR NATURAL E VARIABILIDADE ESPACIAL DE ELEMENTOS TERRAS RARAS EM SOLOS DO RIO GRANDE DO NORTE. 2018.

SOUSA FILHO, Paulo C. de; SERRA, Osvaldo A. Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas. **Química Nova**, v. 37, p. 753-760, 2014.

SOUSA FILHO, Paulo C. de; GALAÇO, Ayla RBS; SERRA, Osvaldo A. terras raras: tabela periódica, descobrimento, exploração no Brasil e aplicações. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1208-1224, 2019.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.; editores técnicos. Manual de Métodos de Análise de Solo - 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TORQUATO, Frederico Campos Regazoni. Sustentabilidade no reaproveitamento de rejeitos de mineração: uma revisão sistemática sobre as diferentes técnicas. 2022.

TYLER, G. Rare earth elements in soil and plant systems-A review. **Plant and soil**, v. 267, n. 1, p. 191-206, 2004.

YEOMANS, J. C.; BREMMER, J. M. A. rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Science and Plant Nutrition*, v.19, p.1467-1476, 1988.

<https://doi.org/10.1080/00103628809368027>