

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**RAYANNA JACQUES AGRA BEZERRA DA SILVA**

**PEDOGÊNESE INICIAL DE TECNOSSOLOS ORIGINADOS DE  
REJEITOS DA MINERAÇÃO DE SCHEELITA NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO**

**RECIFE**

**2023**

Rayanna Jacques Agra Bezerra da Silva  
Bacharel em Engenharia Agrônômica

**Pedogênese inicial de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita no  
semiárido brasileiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Dr. Valdomiro Severino de Souza Júnior

**Recife  
2023**

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)

---

S586p

Silva, Rayanna Jacques Agra Bezerra da  
PEDOGÊNESE INICIAL DE TECNOSSOLOS ORIGINADOS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE SCHEELITA  
NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO / Rayanna Jacques Agra Bezerra da Silva. - 2023.  
113 f. : il.

Orientador: Valdomiro Severino de Souza Junior.  
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2023.

1. Solos antrópicos. 2. Micromorfologia do solo. 3. Mineralogia do solo. 4. Classificação taxonômica de solos. I. Junior, Valdomiro Severino de Souza, orient. II. Título

CDD 631.4

---

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

RAYANNA JACQUES AGRA BEZERRA DA SILVA

**Pedogênese inicial de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita no  
semiárido brasileiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 07 de março de 2023

---

Prof. Dr. Valdomiro Severino de Souza Júnior  
Orientador  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Tiago Osório Ferreira  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – (ESALQ/USP)

---

Prof. Dr. Marcelo Metri Corrêa  
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco –(UFAPE)

Dedico este trabalho a minha amada mãe, Vilma  
Agra da Fonseca e aos meus irmãos, Ygor Jacques  
e Yuri Jacques.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu protetor, por estar sempre comigo, apoiando-me e acompanhando-me. Gratidão, Deus! Sem ti nada seria possível;

Agradeço a minha amada mãe, Vilma Agra da Fonseca, pelo seu amor incondicional e por todos os sacrifícios feitos para hoje eu pudesse estar aqui. Obrigada por toda sua fé e coragem, mãe;

Agradeço aos meus amados irmãos, Ygor Jacques e Yuri Jacques, por todo incentivo, amor e companheirismo. Obrigada por trilharem esse caminho ao meu lado. Vocês são meus maiores exemplos na vida e na profissão;

Agradeço a minha querida avó, Zene dos Anjos, por ser essa luz que guia a família e por toda dedicação e investimentos nos meus estudos;

Agradeço ao meu pai, Roberto Jacques, e a todos os meus familiares, tios, tias, primos e primas por todo apoio nessa caminhada;

Agradeço ao meu namorado que sempre esteve ao meu lado durante o meu percurso acadêmico. Obrigada por todo apoio;

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Valdomiro Severino de Souza Júnior, pela sua amizade, ensinamentos e contribuições valiosas dadas durante todo o processo;

Agradeço aos membros do grupo de pesquisa de mineralogia do solo: Jane Kelly, Laércio Neves, Juliet Emilia, Nara Núbia, Marilya Gabriela, Márlon Ribas, Priscila Lira, Artur Silva, Isamor Gomes, Ana Beatriz, Thayane Menezes e Maria Augusta. Obrigada pelos momentos de ensinamentos e descontração. Nossa convivência diária tornaram os dias mais leves;

Agradeço, em especial, a pós-doutoranda Juliet Emília, por todos os ensinamentos, cuidado e amizade durante a minha caminhada acadêmica. Obrigada por toda sua força, tranquilidade e dedicação neste trabalho;

Agradeço ao meu amigo, Artur Henrique Nascimento da Silva, pela sua sincera amizade e pelo seu apoio incondicional. Obrigada pelos bons momentos e pela companhia na hora do café durante esses anos. Saiba que seu incentivo foi muito importante na minha jornada;

Agradeço aos dedicados estagiários Gustavo Vieira, Camila Brazil, Laura Nascimento, Maeli Santiago, Ana Letícia e Thayane Menezes por terem vivido intensamente a fase de laboratório ao meu lado. Obrigada pelos sorrisos arrancados nos dias difíceis e por sempre acreditarem em mim, até mesmo quando eu não acreditava. O esforço de vocês foi fundamental nesse processo;

Agradeço ao Dr. Jose Coelho de Araújo Filho, por toda disponibilidade e conhecimentos valiosos compartilhados em campo. Sua expertise fez toda diferença na realização deste trabalho;

Agradeço ao professor Dr. Marcelo Metri pela disponibilização do laboratório da UFAPE para realização das análises micromorfológicas. Obrigada pelos seus ensinamentos e dedicação;

Agradeço, em especial, a pós-graduanda Analice Nunes, por toda ajuda e acolhimento em Garanhuns. Obrigada pela sua doce amizade e carinho;

Agradeço ao Técnico, Pedro Gabriel, pelo auxílio nas etapas de leitura das amostras. Obrigada pelo seu esforço e pelas valiosas sugestões e adaptações metodológicas para realização deste trabalho;

Agradeço ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, em especial aos Professores Clístenes Nascimento, Caroline Biondi e Jean Cheyson, por todos os conselhos e ensinamentos durante toda minha jornada acadêmica;

Agradeço à Universidade Federal Rural de Pernambuco e o seu corpo docente pela qualidade e excelência do ensino;

Agradeço a todos os funcionários do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRPE, em especial a Socorro Santana e Vânia. Obrigada pelos abraços afetuosos durante essa jornada;

Agradeço aos meus amigos da pós-graduação que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo;

Agradeço a Mina Brejuí por permitir que esse trabalho fosse realizado e ao Engenheiro de Minas Bruno Tavares, por todo apoio, atenção e disponibilização da sua equipe durante a etapa de coleta;

Agradeço ao doutorando, Luiz Henrique, pelos ensinamentos, apoio, contribuições e disponibilidade em diversas etapas deste trabalho;

Agradeço a contribuição da CPRM, especialmente a Geóloga Ana Cláudia, geólogo André Cunha e da Petrografa Vanja Coelho;

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.



“Uma existência sem sonhos é como uma semente sem solo.”

Augusto Curry

## **Pedogênese inicial de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro**

### **RESUMO**

Estudar tecnossolos é crucial para entender o seu potencial para gerenciar rejeitos, recuperar áreas degradadas, produção agrícola, sequestrar carbono e uso sustentável de recursos naturais. No semiárido do Nordeste brasileiro, no Município de Currais Novos, estado do Rio Grande do Norte, encontra-se a maior mina de scheelita da América do Sul. Contudo, os rejeitos dessa atividade de mineração têm se acumulado em bacias construídas pela mina, a céu aberto, desde a década de 40. Embora os tecnossolos derivados de rejeitos de mineração sejam amplamente estudados no mundo, informações sobre a pedogênese desses solos são escassas no Brasil, especialmente no ambiente semiárido brasileiro. Nesse cenário, os objetivos desse estudo foram: entender a pedogênese de tecnossolos originados da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos) no semiárido brasileiro; ii) compreender a evolução macro e micromorfológica desses tecnossolos; iii) investigar as alterações nas suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas; iv) identificar os principais processos pedogenéticos nos tecnossolos estudados; v) classificar os tecnossolos taxonomicamente, de acordo com a WRB, com proposição ao SiBCS. Os perfis de tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita apresentaram evolução macromorfológica ao longo da cronosequência de 40 anos, com aumento da espessura dos horizontes superficiais, nítido desenvolvimento de cores e estruturas e estágio mais avançado de homogeneização dos seus horizontes. Esses resultados evidenciam a ocorrência de pedogênese dos tecnossolos derivados da mineração de scheelita sob ambiente semiárido brasileiro. De acordo com a WRB, os perfis de tecnossolos com 2, 5 e 10 anos foram classificados como Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic), enquanto o perfil com 40 anos foi descrito como Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic). Com base nas investigações micromorfológicas, foram observados desenvolvimentos de processos pedogenéticos específicos, a exemplo da bioturbação, melanização e pedalização. Ao longo das quatro décadas, houve aumento progressivo do processo de melanização, acompanhado por elevado acúmulo de carbono orgânico. Considerando 0-30 cm de profundidade, o perfil de tecnossolo derivado da mineração de scheelita, com 40 anos, apresentou estoque de carbono ( $131,38 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) superior às principais classes de solos naturais do semiárido brasileiro e estocou três vezes mais carbono que a média dos solos brasileiros. Portanto, os tecnossolos estudados possuem grande potencial para sequestrar carbono no semiárido brasileiro. A elevada reserva natural de nutrientes nos minerais primários das frações areia fina, areia grossa e argila, a exemplo da biotita, feldspatos, actinolita e talco, demonstra o alto potencial desses tecnossolos em fornecer elementos essenciais às plantas a médio prazo e superar as principais limitações nutricionais para o desenvolvimento de atividade agrícola. A presença de caulinita e esmectita em todos os tecnossolos da cronosequência, inclusive no rejeito inicial, indica que os perfis iniciaram seu desenvolvimento enriquecidos nesses filossilicatos. A formação de goethita foi associada à redução da atividade do ferro na solução, com o aumento da umidade e altas concentrações de carbono orgânico nos horizontes dos tecnossolos. Considerando a escassez de informações sobre a construção de tecnossolos derivados da atividade de mineração em ambiente semiárido, este trabalho fornece resultados promissores não apenas para a comunidade científica, mas também para os formuladores de políticas sobre a importância da gestão eficiente dos rejeitos de mineração para recuperar áreas degradadas, produção agrícola e gerenciar rejeitos em ambientes semiáridos.

Palavras-chave: Solos antrópicos. Micromorfologia do solo. Mineralogia do solo. Classificação taxonômica de solos.

## **Early pedogenesis of technosols originating from scheelite mining tailings in the Brazilian semi-arid region**

### **ABSTRACT**

Studying technosols is crucial to understanding their potential for managing waste, recovering degraded areas, agricultural production, carbon sequestration and sustainable use of natural resources. In the semi-arid region of Northeastern Brazil, in the state of Rio Grande do Norte, there is the largest mine of scheelite in South America. However, tailings from this mining activity have accumulated in basins built by the mine since the 1940s. Although technosols derived from mining tailings are widely studied in the world, information on the pedogenesis of these soils is scarce in Brazil, mainly in the Brazilian semi-arid environment. In this scenario, the objectives of this study were: to understand the pedogenesis of technosols originated from scheelite mining over a chronosequence (0, 2, 5, 10, and 40 years) in the Brazilian semi-arid region; ii) understand the macro and micromorphological evolution of these technosols; iii) investigate changes in their physical, chemical and mineralogical properties; iv) identify the main pedogenetic processes in the studied technosols; v) classify the technosols taxonomically, according to the WRB, with a proposition to the SiBCS. The profiles of technosols constructed from scheelite mining tailings showed macromorphological evolution over the 40-year chronosequence, with increased thickness of surface horizons, clear development of colors and structures, and a more advanced stage of homogenization of their horizons. These results show the occurrence of initial pedogenesis of technosols derived from scheelite mining in the Brazilian semi-arid environment. According to the WRB, the 2-, 5-, and 10-year-old profiles of technosols were classified as Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic), while the 40-year-old profile was described as Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic). Based on micromorphological investigations, developments of specific pedogenetic processes were observed, such as bioturbation, melanization, and pedalization. Over the four decades, there was a progressive increase in the melanization process, accompanied by a high accumulation of organic carbon. Regarding the 0-30 cm depth range, the technosol profile derived from scheelite mining, with 40 years old, showed a carbon stock ( $131.38 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) superior to the main classes of natural soils in the Brazilian semi-arid region and stored three times more carbon than the average of Brazilian soils. Therefore, the technosols studied have great potential to sequester carbon in the Brazilian semi-arid region. The high natural reserve of nutrients in the primary minerals of the fine sand, coarse sand, and clay fractions, such as biotite, feldspars, actinolite, and talc, demonstrates the high potential of these technosols in providing essential elements to plants in the medium term and overcoming the main limitations nutrients for the development of the agricultural activity. The presence of kaolinite in all technosols of the chronosequence, including the initial tailings, indicates that the profiles began their development enriched in this phyllosilicate. The formation of goethite was associated with reduced iron activity in the solution, with increased moisture and high concentrations of organic carbon in technosol horizons. Considering the scarcity of information on the construction of technosols derived from mining activity in a semi-arid environment, this work provides promising results not only for the scientific community but also for policymakers on the importance of efficient management of mining tailings to recover degraded areas, agricultural production, and manage waste in semi-arid environments.

**Keywords:** Anthropogenic soils. Soil micromorphology. Soil mineralogy. Taxonomic classification of soils.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa geológico da formação Seridó, com a localização dos perfis de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência, localizado no semiárido brasileiro, no estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos..... 28
- Figura 2.** Perfis de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos) localizado no semiárido brasileiro, no estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos..... 30
- Figura 3.** Características petrográficas do tactito explorado na atividade de mineração de scheelita no semiárido brasileiro. (a) e (b) Epidoto com pequenas inclusões de powellita; (c) e (d) Carbonato; (e) e (f) Vesuvianita; (g) e (h) Titanita.....47
- Figura 4.** Características petrográficas do mármore. (a) e (b) Aspecto geral do mármore com textura poligonal, formada pelos minerais de calcita, tremolita-actinolita (Tr-Act) e poucos minerais opacos; (c) e (d) aspecto geral com destaque para os pequenos cristais de anfibólio (Tr-Act); (e) e (f) cristais de tremolita-actinolita dispostos em textura aproximadamente radial; (g) e (h) cristais euédricos de tremolita-actinolita.....49
- Figura 5.** Características petrográficas do mármore. (a) e (b) Aspecto geral do mármore com textura poligonal, formada pelos minerais de calcita, tremolita-actinolita (Tr-Act) e poucos minerais opacos; (c) e (d) aspecto geral com destaque para os pequenos cristais de anfibólio (Tr-Act); (e) e (f) cristais de tremolita-actinolita dispostos em textura aproximadamente radial; (g) e (h) cristais euédricos de tremolita-actinolita.....51
- Figura 6.** DRX da fração areia fina e grossa analisados na forma de pó não orientado nos perfis de tecnossolos com dois anos (P1) e cinco anos (P2) .....54
- Figura 7.** DRX da fração areia fina e grossa analisados na forma de pó não orientado nos perfis de tecnossolos com dez anos (P3) e quarenta anos (P4).....55

<b>Figura 8.</b> DRX da fração areia fina e grossa analisados na forma de pó não orientado no material de origem formador dos tecnossolos.....	56
<b>Figura 9.</b> DRX da fração argila analisados na forma de pó não orientado no material de origem formador dos tecnossolos.....	57
<b>Figura 10.</b> DRX da fração argila analisados na forma de pó não orientado nos perfis de tecnossolos com dois anos (P1), cinco anos (P2), 10 anos (P3) e 40 anos (P4).....	58
<b>Figura 11.</b> DRX da fração argila analisados na forma de microagregados orientados sobre lâminas de vidro Perfis 1 e 2 de tecnossolos.....	60
<b>Figura 12.</b> DRX da fração argila analisados na forma de microagregados orientados sobre lâminas de vidro Perfis 3 e 4 de tecnossolos.....	61
<b>Figura 13.</b> DRX da fração argila analisados na forma de microagregados orientados sobre lâminas de vidro do material de origem (T0) .....	62
<b>Figura 14.</b> DRX do mármore, material de origem formador do rejeito tecnossolos, analisados na forma de pó e orientado sobre lâminas de vidro.....	62
<b>Figura 15.</b> Fotomicrografias sob luz polarizada do P1 - dos componentes gerais: A: Auk/2Cuk <sub>1</sub> (8x); B: 4Cuk <sub>3</sub> /5Cuk <sub>4</sub> (8x); C: 9Cuk <sub>8</sub> (10x); D: 10Cuk <sub>9</sub> (10x); e das pedofeições: E: nódulo de calcita típico órtico no Auk/2Cuk <sub>1</sub> (100x); F: preenchimento de carbonatos no 4Cuk <sub>3</sub> /5Cuk <sub>4</sub> (16x); G: hiporevestimento de calcita no 9Cuk <sub>8</sub> (100x); H: hiporevestimento de Fe no 9Cuk <sub>8</sub> (40x); I: hiporevestimento de calcita no 10Cuk <sub>9</sub> (40x); J: nódulo de calcita típico órtico no 10Cuk <sub>9</sub> (50x).....	70

**Figura 16.** Fotomicrografias sob luz polarizada do P2 - dos componentes gerais: A: Auk<sub>1</sub>/Auk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub> (20x); B: 4Cuk<sub>3</sub> (20x); C: 7Cuk<sub>6</sub> (10x); e das pedofeições: D: preenchimento de matéria orgânica no 4Cuk<sub>3</sub> (200x); E: revestimento de matéria orgânica no 4Cuk<sub>3</sub> (100x); F: preenchimento solto de material grosso no 4Cuk<sub>3</sub>(16x); G: hiporevestimento de ferro no 4Cuk<sub>3</sub> (200x); H: excrementos no 4Cuk<sub>3</sub> (100x); I: nódulo de calcita no 4Cuk<sub>3</sub> (100x); J: hiporevestimento de Fe no 7Cuk<sub>6</sub> (63x); K: hiporevestimento de Fe no 7Cuk<sub>6</sub> (40x); L: hiporevestimento de calcita no 7Cuk<sub>6</sub> (100x); M: excrementos no 7Cuk<sub>6</sub> (100x).....71

**Figura 17.** Fotomicrografias sob luz polarizada do P3 - dos componentes gerais: A: Auk/2Cuk<sub>1</sub> (10x); B: 3Cuk<sub>2</sub> (10x); C: 4Cuk<sub>3</sub> (10x); D: 8Cuk<sub>7</sub> (10x); e das pedofeições: E: nódulo de calcita típico órtico no Auk/2Cuk<sub>1</sub> (80x); F: revestimento de argila pura amarela no 4Cuk<sub>3</sub> (100x); G: preenchimento de matéria orgânica no 8Cuk<sub>7</sub> (50x); H: capeamento de ligação e revestimento de grãos no 8Cuk<sub>7</sub> (200x).....72

**Figura 18.** Fotomicrografias sob luz polarizada do P4 - dos componentes gerais: A: Auk/Cuk<sub>1</sub> (10x); B: Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (8x); C: 3Cuk (10x); e das pedofeições: D: preenchimento de argila límpida no Auk/Cuk<sub>1</sub> (40x); E: preenchimento de grãos grossos Auk/Cuk<sub>1</sub> (10x); F: excrementos no Auk/Cuk<sub>1</sub> (32x); G: outras estruturas biológicas no Auk/Cuk<sub>1</sub> (32x); H: revestimento de argila límpida no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (200x); I: nódulos agregados e típicos no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (100x); J: excrementos no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (100x); K: hiporevestimento de Mn/Fe no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (32x); L: preenchimento de matéria orgânica no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (80x); M: preenchimento de argila límpida no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (80x); N: nódulo de calcita no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (100x); O: excrementos no 3Cuk (40x); P: revestimento típico de argila no 3Cuk (63x).....73

**Figura 19.** Fotomicrografias sob luz polarizada da distribuição e orientação das biotitas: A: horizonte Auk/2Cuk<sub>1</sub> do P3 (32x); e B: horizonte Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> do P4 (100x).....74

**Figura 20.** Análise discriminante linear baseada nas propriedades físicas e químicas de tecnossolos derivados do rejeito de mineração de scheelita no semiárido brasileiro ao longo de uma cronossequência de 40 anos.....78

**Figura 21.** Estoque do carbono em tecnossolos derivados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência no semiárido brasileiro.....80

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Atributos morfológicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência de 40 anos no semiárido brasileiro.....36
- Tabela 2.** Atributos físicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência de 40 anos no semiárido brasileiro.....38
- Tabela 3.** Atributos químicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência de 40 anos no semiárido brasileiro.....43
- Tabela 4.** Concentrações de ferro em tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência de 40 anos no semiárido brasileiro.....45
- Tabela 5.** Composição mineralógica (%) das principais rochas exploradas na mineração de scheelita, responsáveis por gerar os rejeitos que formaram os tecnossolos.....46
- Tabela 6.** Atributos micromorfológicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência de 40 anos no semiárido brasileiro.....63
- Tabela 7.** Valores de Lambda de Wilks e erro acumulado das variáveis usadas para realização da análise discriminante linear dos tecnossolos derivados do rejeito de mineração de scheelita no semiárido brasileiro.....78
- Tabela 8.** Correlação de Pearson entre os atributos químicos e físicos .....87

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	17
1.1 Hipóteses.....	19
1.2 Objetivos .....	19
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	19
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 Conceito de Solos Antropogênicos .....	21
2.2 Pedogênese de tecnossolos.....	22
2.3 Impacto ambiental da atividade de mineração e a importância dos tecnossolos .....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	26
3.1 Caracterização da área de estudo .....	26
3.2 Amostragem, coleta e preparo das amostras de tecnossolos.....	28
3.3 MÉTODOS ANALÍTICOS .....	31
3.3.1 <i>Análises químicas</i> .....	31
3.3.2 <i>Análises físicas</i> .....	31
3.3.3 <i>Análises mineralógicas</i> .....	32
3.3.4 <i>Extração seletiva de ferro</i> .....	33
3.3.5 <i>Análise micromorfológica de lâmina delgada de solos</i> .....	33
3.3.5 <i>Petrografia</i> .....	33
3.4 Análises estatísticas.....	34
4. Resultados .....	34
4.1 Atributos morfológicos e físicos .....	34
4.2 Atributos químicos.....	40
4.3 Petrografia.....	45
4.4 Atributos mineralógicos.....	52
4.4.1 Mineralogia das frações areia fina e grossa .....	52



4.4.2 Mineralogia da fração argila.....	56
4.5 Atributos micromorfológicos .....	62
4.6 Classificação dos solos na WRB/FAO 2022 .....	74
5. discussões .....	75
5.2 Estoque de carbono.....	78
5.3. Mineralogia do solo.....	81
5.4 Classificação do solo .....	82
5.5 Potencialidades e limitações agrícolas e ambientais .....	83
6. CONCLUSÕES .....	88
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89
APÊNDICE A – Dados morfológicos dos perfis .....	99



## 1. INTRODUÇÃO

Sucessivas atividades antropogênicas têm provocado intensas alterações, perdas, transportes e reorganização dos solos. Como resultado, solos modificados pela atividade humana estão cada vez mais distribuídos em todo o mundo (CAPRA et al., 2015). A intensa intervenção humana sobre o ambiente fez com que a comunidade científica considerasse o ser humano como um importante fator adicional de formação do solo (RICHTER et al., 2011). Por isso, a *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) reconheceu, em 2006, a importância dos solos antropogênicos, incluindo uma nova classificação de solos, a qual pertencem os grupos dos Antropossolos e Tecnossolos (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006).

Antropossolos são solos formados a longo prazo pela intensa atividade humana e que possuem materiais orgânicos e inorgânicos nos horizontes antrópicos. Já os tecnossolos incluem solos formados por artefatos (materiais criados, transportados ou modificados por atividades humanas), incorporando no mínimo 20 % desses materiais em uma profundidade de até 100 centímetros; podendo ser selados ou conter uma geomembrana (ROSSITER, 2006; IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

Tecnossolos são comumente encontrados em áreas urbanas, industriais, agrícolas e em áreas de mineração. A mineração é uma das principais atividades que movimentam a economia brasileira, em função da geração de empregos, arrecadação de impostos e exportação de produtos (IBRAM, 2020), representando cerca de 20 % dos produtos exportados e 5 % do produto interno bruto (PIB). Contudo, essa atividade antrópica é potencialmente prejudicial ao ecossistema, devido à quantidade elevada de rejeitos gerados. Estudo feito pelo Instituto Brasileiro de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) estima que entre os anos de 2010 e 2030, se considerarmos apenas o Brasil, haverá produção acima de 11 bilhões de toneladas de rejeitos de mineração (IPEA, 2012), podendo refletir na perda significativa da qualidade dos solos e no aumento da formação de pilhas de rejeitos expostos a céu aberto.

O Brasil possui a maior mina de scheelita da América do Sul. Situada no semiárido do Nordeste, estado do Rio grande do Norte, a Mina Brejuí foi um marco no desenvolvimento da cidade de Currais Novos e teve suas atividades iniciadas no ano de 1943, data da descoberta do minério (GERAB, 2014). A scheelita é um tungstato de cálcio, com a seguinte composição:  $\text{CaWO}_4$  (CaO 19,4 % e  $\text{WO}_3$  80,6 %) (DANA, 1974). O tungstênio, extraído a partir da scheelita, é um minério estratégico para o comércio interno e externo brasileiro, sendo usado nas indústrias metalúrgicas, elétricas, mecânicas, bélicas, petrolíferas e aeroespaciais (IBRAM, 2015).

Os depósitos de rejeitos resultantes da atividade de mineração de scheelita se acumulam a céu aberto desde o início de suas operações, durante a Segunda Guerra Mundial, em áreas de deposição selecionadas conforme a maior profundidade possível, sendo estas bacias construídas mediante escavação mecânica. 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 no entorno da mina.

Tecnossolos podem fornecer diversos serviços ambientais, tais como: produtos vegetais para produção de alimentos e geração de energia, sequestro de carbono, recarga de águas subterrâneas, meio para gestão de águas pluviais, habitats para a biodiversidade, entre outros (ASENSIO et al., 2019; HEDDE et al., 2019). Essas funções ecossistêmicas tornam o uso dos tecnossolos viáveis sob vários pontos de vistas: agrônômico, ambiental e econômico, pois promovem a recuperação de áreas degradadas de forma menos onerosa e gerenciamento de resíduos das atividades de mineração (FABBRI et al., 2021; RUIZ et al., 2020).

Tecnossolos têm se revelado como um excelente modelo para estudar o fator tempo na pedogênese (LEGUÉDOIS et al., 2016). Estudos sobre a evolução de tecnossolos comumente envolve a identificação de uma cronossequência, consistindo em amostrar e realizar medições em perfis com diferenças de tempo (RUIZ, 2019). Embora os tecnossolos estejam sendo estudados nos últimos anos (PRUVOST et al., 2020; UZAROWICZ et al., 2020), existem poucas pesquisas sobre esses solos no Brasil.

Segundo a Base Scopus, até 2018 apenas 31 artigos tinham sido publicados abordando a pedogênese de tecnossolos, sendo estes a maioria em zonas temperadas e somente cinco em regiões tropicais, mas nenhum nas regiões tropicais brasileiras. Após 2018, algumas pesquisas envolvendo a pedogênese em ambientes tropicais brasileiros foram realizadas (RUIZ et al., 2019; RUIZ et al. 2020a; 2020b; 2020c; RUIZ et al., 2022), destacando a necessidade da continuidade de estudos pedogenéticos sobre esse novo grupo.

Estudos sobre a pedogênese de tecnossolos em regiões tropicais ainda são considerados escassos e, quando comparado com as regiões semiáridas do Nordeste, são ainda mais raros. Essa escassez de estudos reflete na carência de informações sobre os processos pedogenéticos que ocorrem nesses solos e, conseqüentemente, na ausência de reconhecimento dos tecnossolos como uma ordem específica de solos no atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018), sendo esses já reconhecidos na Base de Referência Mundial para Recursos de Solos (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

Nesse cenário, o objetivo desse projeto foi estudar a macro e micromorfologia, a composição mineralógica e os atributos físicos e químicos, visando entender a pedogênese inicial de tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos) no semiárido brasileiro, com intuito de avaliar o seu potencial para sequestrar carbono, produção agrícola e reflorestamento. Esses resultados são fundamentais para o gerenciamento e uso sustentável dos rejeitos da atividade de mineração de scheelita no semiárido brasileiro.

## **1.1 Hipóteses**

- Ao longo da cronosequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos), o estabelecimento da vegetação promove a formação de agregados em tecnossolos por meio da adição de matéria orgânica e da atividade do sistema radicular, desencadeando os processos de pedalização, bioturbação e melanização.
- A formação de tecnossolos originados de rejeito da atividade de mineração de scheelita no semiárido brasileiro promove maior acúmulo de carbono orgânico que os solos naturais ao redor da região de estudo, por causa da elevada concentração de cálcio que favorece a formação de agregados no solo, protege o carbono orgânico da decomposição e aumenta a estabilidade das interações organo-minerais.
- Filossilicatos 2:1 expansíveis são grupos de minerais dominantes na fração argila de tecnossolos ao longo da cronosequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos).
- Rejeitos de mineração de scheelita são alternativas promissoras para a formação de tecnossolos na região semiárida brasileira para fins de gerenciar resíduos, estocar carbono e produção agrícola.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

Estudar a macro e micromorfologia, atributos físicos, químicos e mineralógicos de tecnossolos construídos a partir de rejeitos da atividade da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos) no semiárido brasileiro, com objetivo de entender sua pedogênese inicial e avaliar o potencial desse rejeito.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Caracterizar os atributos morfológicos, físicos e químicos de tecnossolos para fins de compreender sua gênese e classificação taxonômica;
- Avaliar os atributos micromorfológicos de tecnossolos construídos a partir de rejeitos da atividade de mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos), para identificar processos pedogenéticos e entender a evolução dos tecnossolos;
- Identificar a composição mineralógica das frações areia e argila dos tecnossolos para compreender os processos pedogenéticos envolvidos na formação de minerais secundários;
- Determinar o estoque de carbono em tecnossolos derivados da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos) no semiárido;
- Avaliar o potencial dos rejeitos da atividade de mineração de scheelita para formação de tecnossolos no semiárido brasileiro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Conceito de Solos Antropogênicos

Solos antropogênicos são aqueles cujos processos pedogenéticos são influenciados, modificados ou criados pela atividade humana, em contraste com solos formados por processos naturais (DE KIMPE; MOREL, 2000). Em 2006, a edição do *World Reference Base for Soil Resources* (WRB), publicado pela Internacional Union of Soil Science (IUSS), incluiu uma nova classificação de solos, a qual constitui os grupos dos Antropossolos e Tecnosolos (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006).

Antropossolos são solos resultantes da atividade agrícola de longo prazo, como irrigação, adição de resíduos orgânicos, estando associados a áreas de cultivos históricos, especialmente em áreas onde civilizações antigas estiveram presentes. Já os tecnossolos são classificados taxonomicamente por apresentarem 20% ou mais de artefatos em uma profundidade de até 100 centímetros; podendo conter uma geomembrana impermeável ou serem selados (ROSSITER, 2006; IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

Por definição, artefatos são materiais feitos ou fortemente modificados, expostos por atividades humanas, que não ocorreriam espontaneamente na superfície da Terra de forma natural, tais como: resíduos de construção e demolição, tijolos, resíduos de concreto, vidro, lixo, alguns resíduos industriais, entulho de mina, sedimentos dragados, entre outros (FABBRI et al., 2021; IUSS WORKING GROUP WRB, 2022). Devido ao rápido crescimento da população que vem acompanhada por crescente urbanização e transformações da natureza (MONASTERSKY, 2015), cada vez mais esses artefatos se acumulam na superfície terrestre (RUIZ et al. 2020c; RUIZ et al., 2022) e, como resultado, os tecnossolos serão cada vez mais frequentes.

Tecnossolos são caracterizados por apresentar elevada variabilidade na organização espacial e ampla gama de artefatos dentro do perfil (DE KIMPE; MOREL, 2000). Esses solos podem ser formados em virtude de um único acontecimento, a exemplo dos desastres de derramamentos que ocorrem em vários países do mundo (ARMSTRONG et al., 2019), incluindo o Brasil (THOMPSON et al., 2020; DO CARMO et al., 2017), ou por constante acúmulo de materiais tecnogênicos, como resultado de atividades humanas em áreas urbanas ou industriais (BARREDO et al., 2020)

A inclusão dos solos antropogênicos na Base de Referência Mundial para Recursos de Solos (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006), destacando-se para esse estudo o grupo dos tecnossolos, é uma indicação do reconhecimento da importância que esses solos têm para a

qualidade de vida da população. Embora o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) não reconheça esses solos como uma ordem de solo, os tecnossolos são cada vez mais frequentes em toda superfície. Estudos sobre as propriedades morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas dos tecnossolos podem contribuir para a possível atualização do SiBCS ao evidenciarmos sua importância (SANTOS et al., 2018).

## **2.2 Pedogênese de tecnossolos**

Os tecnossolos fazem parte da nova era geológica atual, o Antropoceno (MONASTERSKY, 2015). Mesmo recente, a gênese desses solos está susceptível aos mesmos processos pedogenéticos iniciais que ocorrem em solos naturais, os quais segundo Jenny (1941) são classicamente descritos como um grupo de processos de adição, perda, transformação e translocação, sofridas por um material *in situ*. Ademais, quando comparado os tecnossolos com os solos derivados de rochas e sedimentos, os tecnossolos são resultantes da ação conjunta dos mesmos fatores de formação do solo (clima, organismos, relevo, material de origem e tempo) (HUOT et al., 2015) estabelecido para solos naturais (JENNY, 1941).

Diversos autores apontam que a gênese de tecnossolos pode ser mais rápida que a dos solos naturais e, a depender das condições locais, maiores taxas de intemperismo desses solos podem ser observadas em zonas tropicais úmidas em comparação com as zonas temperadas (RUIZ, 2019; SÉRÉ et al., 2010). Outro fator que influencia na gênese dos tecnossolos é o desequilíbrio que artefatos, originados artificialmente ou escavados, apresentam nas condições de superfície (DE KIMPE; MOREL, 2000). Esses materiais afetam expressivamente as etapas iniciais da gênese e, no geral, contém grandes quantidades de minerais primários (HUOT, 2015).

A composição química e propriedades físicas dos artefatos podem ser diferentes das que compõem os solos naturais, afetando assim a velocidade de intemperismo e formação de solo (DUCHAUFOR, 1991). Tecnossolos podem apresentar propriedades físicas extremas, tais como: frequentemente alcalinizantes, baixo teor de nutrientes ou alto teor de carbono, refletindo a natureza, composição e características do material original (RUIZ et al., 2020b).

A vegetação tem ação significativa no intemperismo dos solos formados por artefatos e podem refletir nos processos pedogenéticos (por exemplo: pedoplasmação e melanização) que define a morfologia e evolução do perfil de tecnossolo (SENRA et al., 2019; RUIZ 2020b; RUIZ et al., 2022). Esses materiais vegetados, em pequeno espaço de tempo, influenciam na estrutura do solo, acelerando a evolução e promovendo agregação pela atividade da matéria orgânica. (HUOT et al., 2014a; RUIZ et al., 2020c).



Os processos pedogenéticos dos solos antropogênicos podem ser mais bem estudados mediante estudos micromorfológicos. Embora alguns estudos abordem o desenvolvimento dos tecnossolos em escalas micromorfológicas no mundo (HOWARD; ORLICKI, 2016), poucos são os dados científicos que relacionem aspectos micromorfológicos no Brasil (RUIZ et al. 2022), sendo ainda mais escassos no Nordeste. A micromorfologia é capaz de medir, descrever e interpretar os componentes na escala microscópica e submicroscópica (BULLOCK et al., 1985; STOOPS, 2020), possibilitando o conhecimento amplo dos constituintes e suas implicações ao longo do perfil de tecnossolo.

### **2.3 Impacto ambiental da atividade de mineração e a importância dos tecnossolos**

A mineração está entre as atividades humanas mais importante para economia brasileira, sendo responsável por 20% de todos os produtos exportados e por 5% do produto interno bruto (MME, 2018). Contudo, a poluição do solo, a erosão, a perda total ou parcial de áreas são consequências dessa atividade, principalmente pela geração de resíduos e pilhas de entulhos (GERAB, 2014). Esses resíduos podem ser usados para construir tecnossolos.

Tecnossolos podem ser desenvolvidos de maneira espontânea a partir de despojos de mina expostos a céu aberto, ou criados especificamente pela união de diferentes resíduos e rejeitos (RUIZ et al., 2020c). Tecnossolos formados pela atividade de mineração são susceptíveis à poluição (PETTA et al., 2014), pois, entre os seus artefatos podem ser encontrados na composição do material originário elevados teores de metais pesados, fósforo, nitrogênio, carbono, combustíveis fósseis, hidrocarbonetos e diversas outras matérias minerais ou orgânicas de origem antrópica (POUYAT et al., 2010). As composições dos artefatos afetam a intensidade dos processos pedogenéticos e as funções dos tecnossolos (HUOT et al., 2013, 2014a, 2014b). Variados serviços ambientais podem ser fornecidos pelo uso de tecnossolos, como produtos vegetais para produção de alimentos e geração de energia, sequestro de carbono, recarga de águas subterrâneas, meio para gestão de águas pluviais e habitats para a biodiversidade (YILMAZ et al. 2016; ASENSIO et al., 2019; HEDDE et al., 2019; SCHAD, 2018; RUIZ, 2020a)

Diversos autores têm demonstrado a utilização de tecnossolos para recuperar áreas abandonadas pela atividade de mineração (ROKIA et al., 2014; SANTOS et al., 2019; RUIZ et al., 2020a). O uso de tecnossolos demonstrou ser eficiente em aumentar a qualidade dos solos ao entorno das minas e até mesmo ser um substrato adequado para o cultivo de plantas onde o solo original foi perdido (RUIZ et al. 2020c; ASENSIO et al., 2019). Contudo, a maior parte dos estudos estão reunidos em zonas temperadas, principalmente na Europa (SOKOLOV et al.,

2015; VILLENAVE et al., 2018) e, quando comparado com regiões tropicais, poucas são as pesquisas sobre esse grupo de solos (RUIZ et al., 2020b).

A depender das condições ambientais, a gênese de tecnossolos pode ser mais rápida do que os solos naturais (RUIZ, 2019), o que nos leva a inferir que as regiões tropicais contemplariam um cenário mais adequado para recuperação de áreas degradadas, devido a maior intensidade das taxas de intemperismo. Nesse contexto, a rápida pedogênese de tecnossolos pode ser ainda mais interessante para a região do semiárido brasileiro, onde os solos, em geral, são pouco desenvolvidos, rasos e pedregosos (CURI et al., 2017). No entanto, informações sobre a evolução de tecnossolos em regiões semiáridas são raras, principalmente no semiárido brasileiro.

A região semiárida é de extrema importância e abrange principalmente a região nordestina, cobrindo aproximadamente 1.128.697 km<sup>2</sup> do território brasileiro (SUDENE, 2017). No semiárido do Nordeste, encontra-se a maior mina de scheelita da América do Sul, 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. Suas atividades se iniciaram no ano de 1943, data da descoberta do minério (GERAB, 2014).

A scheelita é um tungstato de cálcio, contida no tactito, com composição: CaWO<sub>4</sub> (CaO 19,4 % e WO<sub>3</sub> 80,6 %) (DANA, 1974). Em geral, a scheelita forma agregados granulares e maciços com estrutura cristalina tetragonal, sua densidade é de 5,9 g/cm<sup>3</sup> a 6,3 g/cm<sup>3</sup> e dureza de 4,5 a 5,0 na escala de Mohs (KLEIN; DUTROW, 2012). O tungstênio, extraído a partir da scheelita, é um minério estratégico para o comércio interno e externo brasileiro, sendo usado nas indústrias metalúrgicas, elétricas, mecânicas, bélicas, petrolíferas e aeroespaciais (IBRAM, 2015).

O processo de beneficiamento da scheelita na mina Brejuí é realizado pelo método de lavra, que consiste em detonações no interior da mina, gerando fragmentos de rochas que são transportadas por caminhões basculantes, depositados em uma grelha, levados ao britador e posteriormente depositados em mesas vibratórias. Nas mesas vibratórias, pela diferença de densidade da scheelita, é realizada a separação desse minério dos rejeitos (RAMOS FILHO, 2021).

Os rejeitos são formados principalmente pelos minerais de ganga (presente no tactito), silicatos, alguns carbonatos, paragonita e uma porcentagem de aproximadamente 30 % que se refere a diluição (mistura de material estéril, que não possui minério). Vale ressaltar que dentro do próprio tactito (rocha que contém o minério de interesse econômico), pode conter mais de

60 tipos de minerais como epídoto, vesuvianita, calcitas alteradas, paragonitas, entre outros. Entre esses minerais, a scheelita é o de maior interesse econômico da Mina Brejuí.

Os fragmentos depositados nas mesas vibratórias separam três tipos de materiais que são considerados os constituintes finais do beneficiamento: a scheelita, o misto e o rejeito grosso (partículas de granulometria arenosa que irão para o descarte). O misto (composto por rejeitos do beneficiamento e scheelita que ainda passará pelo processo de reaproveitamento) após recolhido, é transportado ao heliconde e levado a outras mesas de retorno até que não seja mais possível remover as partículas de scheelita contida na mistura. Em seguida, o misto segue para o classificador onde é realizada a separação das partículas finas e água (lama) das partículas mais grossas presentes (RAMOS FILHO, 2021; GERAB, 2014)

A lama que ainda contém parte da água (lama mais úmida) é transportada até um reservatório chamado de espaçador, melhorando a turbidez e permitindo reutilização. Já a lama mais seca é depositada a céu aberto e denominada de resíduo fino do processo de beneficiamento da scheelita. O minério puro é obtido após secagem total do resíduo fino exposto ao sol e posterior queima em fornos para eliminação das impurezas. A condução da scheelita dá-se por uma máquina (eletroímã) que separa os elementos magnéticos da scheelita, como o ferro, para futura comercialização.

O processamento mecânico para obtenção de scheelita na mina resulta em grandes quantidades de rejeito e estéril, sendo estes acumulados a céu aberto em áreas previamente selecionadas para deposição do rejeito (RAMOS FILHO, 2021). A elevada quantidade de rejeito deve-se aos interesses econômicos, pois somente a scheelita é de interesse para Mina e o que sobra, após o beneficiamento, é considerado rejeito do mineral.

Dentre os principais rejeitos observados na região, destacam-se: i) dois aterros que cobrem uma área de 121.500 m<sup>2</sup>, com volume de 1.943.200 m<sup>3</sup>, totalizando 3.110.400 toneladas (CARVALHO et al., 2002; FERNANDES et al., 2009); ii) rejeitos de lama com aproximadamente 1.500.000 toneladas de resíduo. Esses resíduos podem ser usados para construir tecnossolos. Contudo, a ausência de bases científicas sobre as funções e importância dos tecnossolos impede que as agências reguladoras governamentais estimulem e autorizem a utilização de tecnossolos como uma alternativa estratégica e sustentável para destinação dos rejeitos de mineração de scheelita no semiárido brasileiro. Em adição, a escassez de estudos reflete ausência reconhecimento dos tecnossolos como uma ordem específica de solos no atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no semiárido do nordeste brasileiro, no Município de Currais Novos, estado do Rio Grande do Norte, na Mina Brejuí (6°19'19" Sul e 36°32'52" Oeste), considerada a maior mina de exploração de tungstato de cálcio (scheelita; CaWO<sub>4</sub>) da América do Sul, em operação a mais de 70 anos (GODEIRO, et al., 2010).

Situado a 10 km do centro de Currais Novos, no geosítio da Mina Brejuí, (Figura 1), ocorrem diversos tipos de rochas, sendo identificados paragnaisses de cor cinza, constituídos de quartzo, feldspato e biotita, além de epidoto, microlina, muscovita, minerais opacos, tremolita/actinolita, dentre outros, destacando-se a grande reserva de calcário e o tungstênio, principal produto a ser extraído.

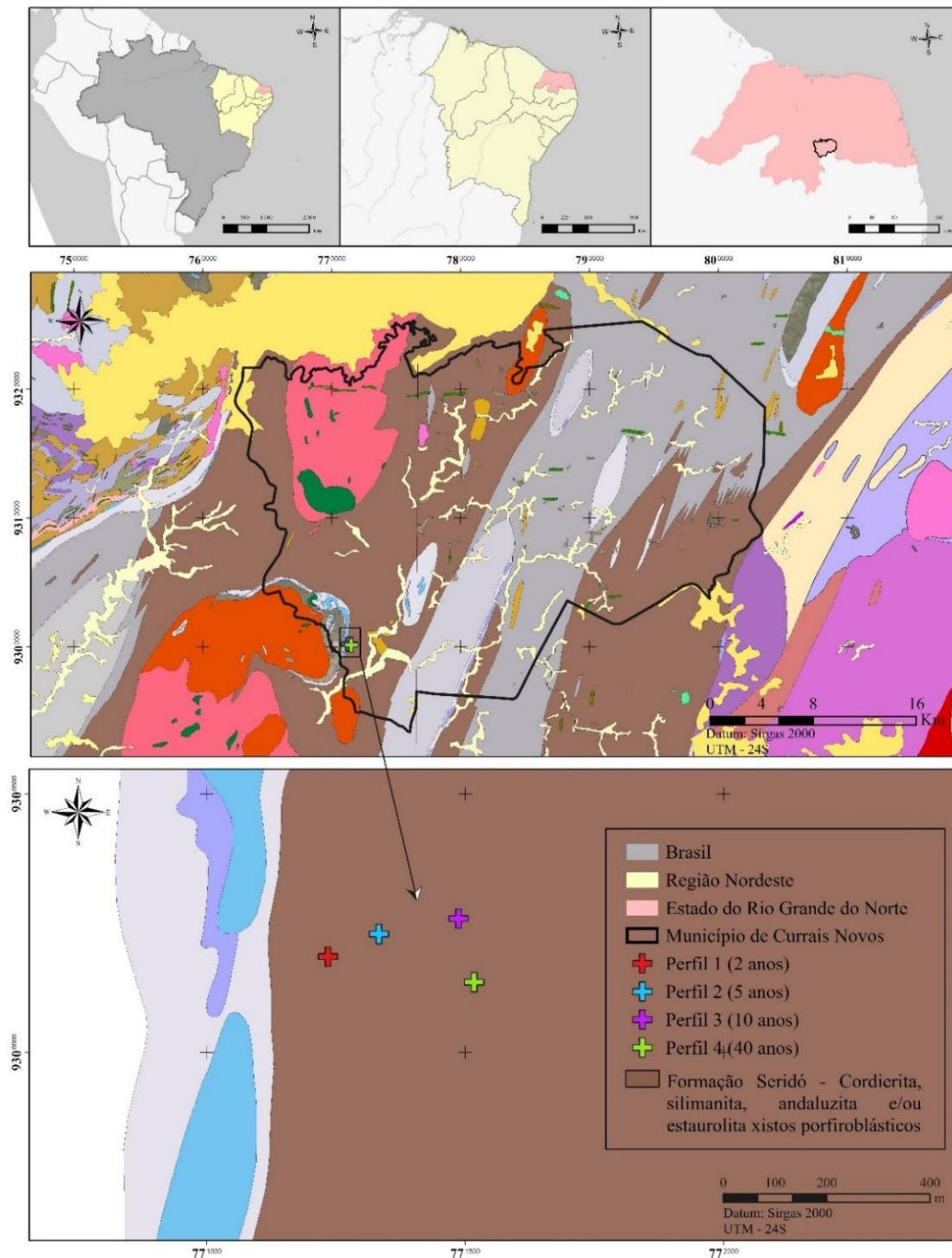
Estudos revelam que o tungstênio se concentra nas menores frações granulométricas (GODEIRO, et al., 2010) e a composição do resíduo de scheelita da Mina Brejuí é constituído em maior quantidade por calcita e quartzo (GERAB, 2014; MEDEIROS, 2016). O clima da região é do tipo BSh (KOTTEK et al., 2006), caracterizado por precipitações irregulares com secas prolongadas, o período chuvoso ocorre entre os meses de fevereiro e abril, com precipitação pluvial média de 610 mm/ano. O bioma é caracterizado pela caatinga hiperxerófila.

O processo de extração do minério de scheelita da Mina Brejuí ocorre por meio de lavra subterrânea com aproximadamente 65 km de extensão, constituída por túneis de até 900 m de profundidade (GERAB, 2014). No beneficiamento é utilizado o princípio da gravidade devido a maior densidade da scheelita em relação a outros minerais presentes nas rochas. Nesse sentido, para beneficiar o tungstênio contido na scheelita obtida, não são utilizados reagentes para separações químicas, sendo assim considerada uma etapa mais dispendiosa (RAMOS FILHO, 2021).

A área de deposição dos rejeitos é selecionada de acordo com a profundidade. Áreas mais profundas são preferencialmente escolhidas para ampliação da capacidade de armazenamento do rejeito. Para etapa de construção das bacias, com profundidade média de cinco metros, são utilizadas escavadeiras mecânicas ou tratores de esteiras. As paredes das bacias possuem uma largura aproximada de três metros e são feitas mediante uso do próprio material compactado com o peso do equipamento. A chegada do rejeito formador dos tecnossolos ocorre via bombeamento da polpa e, quando se atinge 80 % da capacidade do reservatório, é feita outra bacia para construção de novos tecnossolos.

Os tecnossolos construídos a partir dos rejeitos da atividade de mineração de scheelita foram estudados por meio de 4 (quatro) perfis que seguem uma sequência cronológica (2, 5, 10 e 40 anos), segundo informações repassadas pela administração da Mineradora (Figura 2). Os perfis foram abertos, descritos, classificados e coletados de acordo com a Base de Referência Mundial (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022). O rejeito recém-originado (tempo zero) também foi caracterizado. Foram coletadas amostras deformadas e não deformadas dos horizontes e/ou camadas para a realização das análises físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas.

**Figura 1.** Mapa geológico da formação Seridó, com a localização dos perfis de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência, localizado no semiárido brasileiro, no estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos.



### 3.2 Coleta e preparo das amostras de tecnossolos

Os perfis de tecnossolos foram selecionados, 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 ao longo de uma cronosequência de 40 anos (0, 2, 5, 10 e 40 anos). As amostras coletadas foram secas à temperatura ambiente, destorroadas, quarteadas, tamisadas em peneira com abertura de malha de 2 mm (Terra Fina Seca ao Ar - TFSA) e por fim, armazenadas. Em campo, foi detectada a presença, em grandes quantidades, de carbonato em todos os horizontes e perfis de solo, sendo necessário realizar pré tratamentos para eliminação de carbonato, uma vez que a presença comprometeriam a qualidade de algumas análises, a exemplo das mineralógicas e física (granulometria).

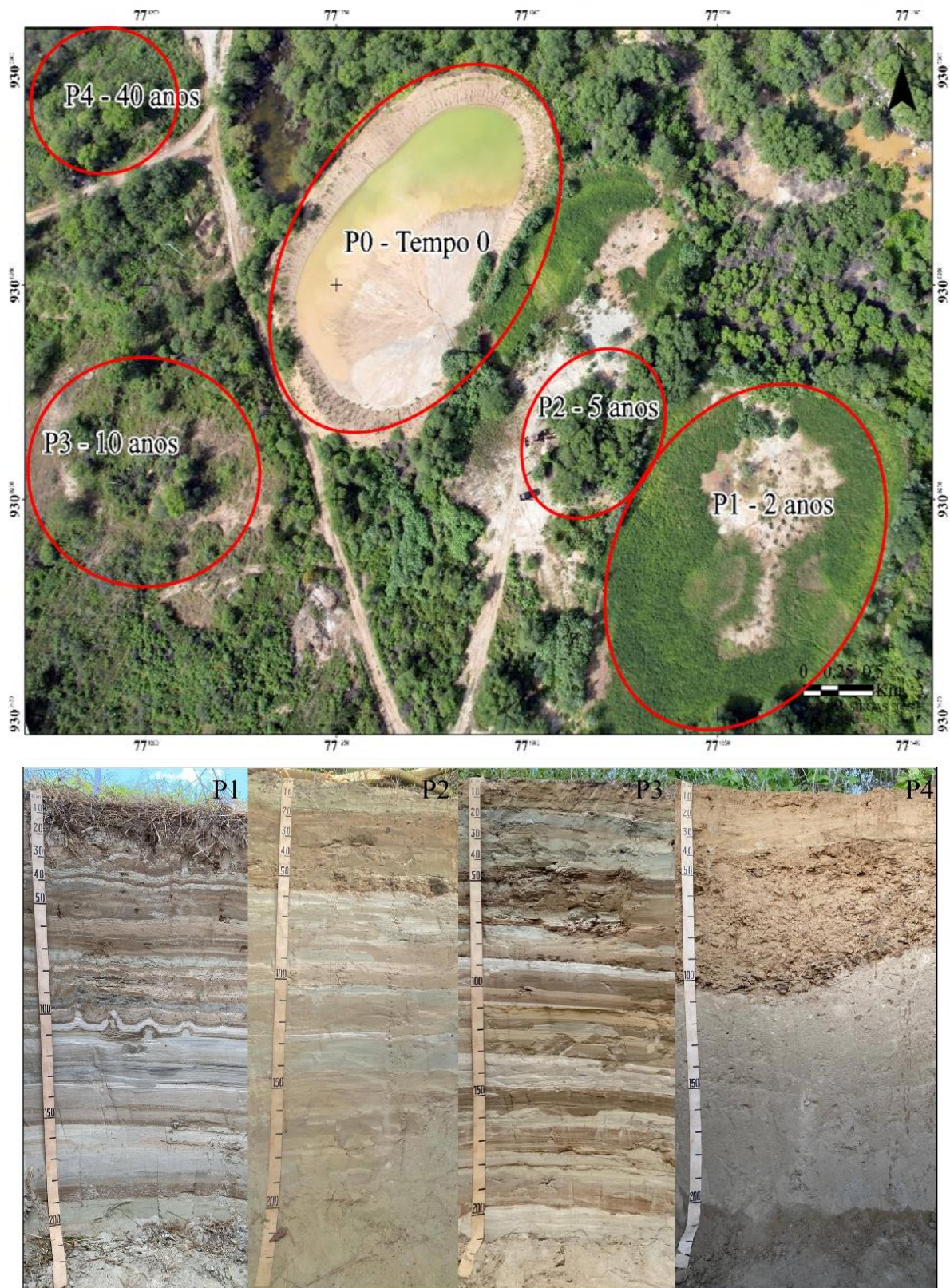
Para eliminação de carbonatos foram pesados 150 g de solo em recipientes, adicionado uma solução de ácido clorídrico (HCl) diluído 1:10 e observada a efervescência. Após finalizada a adição, as amostras foram hermeticamente fechadas e deixadas em repouso por 12 horas. Finalizado o repouso, foi repetido todo o processo. A adição de ácido foi suspensa após verificada a ausência total de efervescência do solo dentro dos recipientes, sendo posteriormente submetidos a lavagens com álcool a 60% para eliminação dos cloretos (TEIXEIRA et al., 2017).

Foi necessário realizar lavagens para sais em algumas amostras que apresentaram condutividade elétrica superior a  $4 \text{ dSm}^{-1}$ . A lavagem foi realizada em funil contendo papel de filtro e adicionado álcool etílico a 60%. A lavagem foi realizada até que uma pequena porção do filtrado não apresentasse reação de cloretos pelo nitrato de prata (TEIXEIRA et al., 2017). Após todos os pré tratamentos as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm).

Foram coletadas amostras de rochas que representassem, em geral, a composição química e mineralógica dos resíduos que formam os perfis de tecnossolos amostrados. A coleta foi realizada dentro da mina, próximas de onde é realizado o garimpo que formam os rejeitos formadores dos tecnossolos. Em laboratório, as rochas foram moídas usando um moinho de esfera com compartimento de amostra e bolas feitas de ágata para posteriores análises.



**Figura 2.** Perfis de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência (0, 2, 5, 10 e 40 anos) localizado no semiárido brasileiro, no estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos.





### 3.3 MÉTODOS ANALÍTICOS

#### 3.3.1 Análises químicas

O pH foi determinado em água e KCl 1 mol L<sup>-1</sup> (1: 2,5 solo: solução). Foi preparada a pasta de saturação para determinação do pH em pasta e da condutividade elétrica. O sódio, potássio e P disponíveis foram extraídos por Mehlich-1 e determinados por fotômetro de chama e fotocolorímetro. A concentração de P também foi determinada seguindo o método de Olsen desenvolvido para solos de reação alcalina e, ou, calcários (OLSEN; SOMMERS, 1982). O cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foram extraídos com KCl (1 mol L<sup>-1</sup>; razão 1:10 solo: solução) (TEIXEIRA et al., 2017) e determinados por absorção atômica. A acidez potencial (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) foi determinada pelo método do acetato de cálcio (0,5 mol L<sup>-1</sup>, pH 7,0). De posse dos resultados obtidos do complexo sortivo, foram calculados os valores de soma de base (SB), capacidade de troca de cátions potencial (T) e efetiva (t), saturação por bases (V) e saturação por Al (m).

O carbono orgânico total foi analisado pelo método de Walkey-Black (YEOMANS; BREMMER, 1988). O estoque de carbono orgânico foi calculado conforme Weissert et al. (2016) de acordo com a equação: ECO= Ds \* e \* CO; em que “Ds” é a densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); “e” é a espessura (m) da camada analisada e “CO” é o teor de carbono orgânico (%) na camada avaliada.

#### 3.3.2 Análises físicas

As frações maiores que 2mm (cascalho e calhaus) foram separadas e quantificadas conforme recomendado pela Teixeira et al. (2017). A composição granulométrica da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) foi feita pelo método do densímetro e posterior sedimentação (Lei de Stokes). A separação das frações foi realizada em agitador do tipo Wagner, por 16 horas. Como dispersante, foi utilizado o hexametáfosfato de sódio + hidróxido de sódio (Calgon). A fração areia total foi obtida por peneiramento, passando por uma peneira com abertura de malha de 0,053 mm e posteriormente, após secas, foram separadas as frações areia fina e areia grossa, passando em peneira com abertura de malha de 0,2 mm. As menores frações, argila e silte, foram separadas de acordo com o tempo de sedimentação da partícula do silte proposto pela Lei de Stokes:

$$\text{Equação: } v = \frac{g(S_p - S_i)D^2}{18\eta}$$

Onde:

V= velocidade de sedimentação;

g= constante gravitacional;

Sp - Si = massa específica da partícula - a do líquido;

D= diâmetro da partícula em cm;

$\eta$ = viscosidade.

A argila foi obtida por sifonação e seca em estufa a 60° C. Posteriormente o material foi macerado em almofariz de ágata, passado em peneira de 80 mesh e armazenado para posteriores análises. A densidade de partículas foi realizada pelo método do balão volumétrico de acordo com Teixeira et al. (2017).

### 3.3.3 Análises mineralógicas

As amostras de TFSA dos três horizontes representativos de cada perfil dos tecnossolos foram submetidas a separação das frações granulométricas. Para a dispersão química das amostras foi utilizado como agente dispersante o Calgon, 0,01 mol L<sup>-1</sup>. A fração areia foi separada por peneiramento úmido utilizando uma peneira com abertura de malha de 0,053mm, após dispersão. Posteriormente a lavagem da fração areia, foi feita a secagem para separação em fração areia fina e areia grossa, passando por peneira com abertura de malha de 0,2 mm (TEIXEIRA et al., 2017). A fração argila foi separada da fração silte por sedimentação e posterior sifonação. A identificação da composição mineralógica das frações dos três horizontes selecionados foi determinada por difratometria de raios X, sendo utilizado um difratômetro Shimadzu XRD 6000, operando com radiação de Cu K $\alpha$  a 40 kV e 30 mA, com monocromador de grafite.

A composição mineralógica das frações areia e argila naturais em forma de pó não orientado, foi analisada com velocidade de 1° min 2 $\theta$ , registrando amplitude de 5 a 70° (2 $\theta$ ). As amostras de argila naturais foram submetidas a pré-tratamentos de remoção de óxidos de ferro pelo método de ditionito-citrato-bicarbonato (JACKSON, 1975), objetivando eliminar os agentes cimentantes que reduzem a qualidade dos difratogramas. Para a identificação dos filossilicatos, as amostras foram orientadas sobre lâminas de vidro. A orientação das argilas foi realizada sob a forma de sedimentação na pipeta, deixando suspenso 100 mg de argila que representa 10 mg cm<sup>2</sup> de argila na superfície de cada lâmina, padronizando a quantidade de argila em todas as amostras.

Para caracterização dos minerais expansivos, as amostras foram saturadas com KCl (1 mol L<sup>-1</sup>) e analisadas à temperatura ambiente (25°C) e posteriormente aquecida por três horas a

110°, 350°C e 550°C, sendo estas analisadas no intervalo de cada temperatura. A amplitude de varredura no DRX foi de 3° a 35° 2 $\theta$  e velocidade de registro de 1o min 2 $\theta$ . Vale ressaltar que parte das amostras também foi saturada com MgCl<sub>2</sub> (1 mol L<sup>-1</sup>) e posteriormente solvatada com glicerol, sendo estas analisadas a temperatura ambiente.

A interpretação dos difratogramas e os critérios usados na identificação dos minerais constituintes das amostras foram baseados no espaçamento interplanar (d), forma, largura e intensidade dos picos e comportamento frente aos tratamentos de acordo com Jackson (1975); Brown e Brindley (1980); Moore e Reynolds Jr (1997).

### ***3.3.4 Concentrações de Ferro***

A proporção molecular do ferro total (expressa em óxidos) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,) nas amostras de tecnossolos foi determinada por fluorescência de raios X (FRX) com dispersão por comprimento de onda. A perda ao fogo foi determinada em estufa a 1000° C.

O ferro foi determinado na TFSA extraído por dissolução seletiva dos óxidos pedogenéticos de alta e baixa cristalinidade e formas não cristalinas pelos métodos do ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (MEHRA; JACKSON, 1960; HOLMGREN, 1967) e oxalato ácido de amônio (pH 3) no escuro (MCKEAGUE; DAY, 1966), respectivamente. Os teores de Fe nos extratos foram determinados por espectroscopia de absorção atômica, sendo os resultados expressos na forma de óxidos.

### ***3.3.5 Análise micromorfológica de lâmina delgada de solos***

Para realização das análises micromorfológicas, foram coletadas amostras indeformadas, ou seja, extraídas de forma que manteve sua estrutura preservada. As amostras foram secas ao ar livre para eliminar o excesso de umidade. Após esse processo foi realizada a impregnação das amostras, de forma que não alterasse o arranjo dos constituintes ou propriedades ópticas, permitindo que os blocos se tornassem mais resistentes para a etapa de laminação. Após a laminação foram realizados polimentos e interpretação microscópica. As seções delgadas foram analisadas em microscópio petrográfico e as descrições realizadas de acordo com Stoops (2020).

### ***3.3.5 Petrografia***

Amostras de scheelita, mármore e gnaiss, principais materiais de origem formadores dos tecnossolos, foram coletadas nas minas subterrâneas da mineradora Brejuí e suas composições mineralógicas modais foram identificadas em microscópio petrográfico

(OLYMPUS BX-51), utilizando lâminas (cortes finos polidos) preparadas de acordo com com Murphy (1986) e descritas seguindo as recomendações de Fitzpatrick (1993).

### 3.4 Análises estatísticas

Os resultados analíticos foram avaliados por meio de procedimentos estatísticos univariados e multivariados. Para os métodos univariados, foi utilizada a estatística descritiva (média, máximo, mínimo, mediana e desvio padrão) e correlações lineares de Pearson (com níveis de significância  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ ). Para os procedimentos estatísticos multivariados foi realizada a análise discriminante (AD). As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica 12.5.

A análise de correlação de Pearson foi usada para estudar a relação entre as propriedades químicas e físicas dos tecnossolos ao longo de uma cronossequência. A análise discriminante foi realizada para confirmar os grupos previamente formados a partir da análise de agrupamento. A análise discriminante foi realizada com base nas propriedades físicas e químicas dos tecnossolos ao longo de uma cronossequência. A análise discriminante permitiu avaliar as mudanças entre os grupos e as diferenças entre os tecnossolos. Os tratamentos resultantes com base na análise discriminante foram aplicados para reconhecer os fatores-chave que controlam a variabilidade entre os tecnossolos em relação à cronossequência.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Atributos morfológicos e físicos

Os perfis de tecnossolos são observados na Figura 2 e os atributos morfológicos na Tabela 1. Os quatro perfis de tecnossolos foram classificados como: Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (P1), Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (P2), Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (P3), Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic) (P4), com os seguintes horizontes: Auk-2Cuk<sub>1</sub>-3Cuk<sub>2</sub>-4Cuk<sub>3</sub>-5Cuk<sub>4</sub>-6Cuk<sub>5</sub>-7Cuk<sub>6</sub>-8Cuk<sub>7</sub>-9Cuk<sub>8</sub>-10Cuk<sub>9</sub> (P1); Auk<sub>1</sub>-Auk<sub>2</sub>-2Cuk<sub>1</sub>-3Cuk<sub>2</sub>-4Cuk<sub>3</sub>-5Cuk<sub>4</sub>-6Cuk<sub>5</sub>-7Cuk<sub>6</sub> (P2); Auk-2Cuk<sub>1</sub>-3Cuk<sub>2</sub>-4Cuk<sub>3</sub>-5Cuk<sub>4</sub>-6Cuk<sub>5</sub>-7Cuk<sub>6</sub>-8Cuk<sub>7</sub> (P3); Auk-Cuk<sub>1</sub>-Cuk<sub>2</sub>-2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub>-3Cuk<sub>z</sub> (P4), respectivamente (Tabela 1).

Os tecnossolos exibiram consideráveis variações de cor nos perfis, apresentado desde colorações acinzentadas a colorações brunadas (Tabela 1). Foram observadas mudanças de textura entre os tecnossolos, sendo mais evidenciada no P1 que apresentou variações abruptas desde Franca-Arenoso nos horizontes Auk a Argila no 5Cuk<sub>4</sub> dentro dos 100 cm de profundidade. Os perfis P2, P3 e P4, em geral, apresentaram predomínio das texturas

francoarenosa e areia-franca, com exceção do horizonte 4Cukz<sub>3</sub> em P2 e 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> em P4 que apresentaram textura Franco-argilosa. P1, P2, P3 e P4 apresentaram estrutura variando de fraca a moderada e com tamanhos variando de pequeno a médio.

Nos perfis P1, P2 e P3, foi observada a formação de estrutura laminar, exceto nos horizontes superficiais, onde foi observada estrutura granular e em blocos subangulares no horizonte Auk do P1, e em blocos subangulares nos horizontes Auk<sub>1</sub> e Auk<sub>2</sub> do P2 e Auk do P3. O P4, por ser o tecnossolo mais antigo (40 anos), apresentou estrutura mais desenvolvida, predominando a estrutura em blocos subangulares, exceto no horizonte 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> que apresentou blocos angulares e subangulares (Tabela 1). Em geral, não foi observada a presença de mosquedados nos tecnossolos ao longo da cronossequência, exceto no horizonte 9Cuk<sub>8</sub> do P1 (Tabela 1).

Nos tecnossolos mais jovens (P1, P2 e P3) não foi observada a presença de cascalhos (Tabela 2). Contudo, no perfil com 40 anos (P4) foi verificada a presença dessa fração, em pequenas quantidades, nos horizontes Cuk<sub>2</sub> e 3Cukz. Após a fração areia total ter sido separada em areia fina e grossa, observou-se predomínio da fração areia fina em todos os perfis de tecnossolos (Tabela 2).

Quando comparado as frações areia, silte e argila dos perfis, em geral, P2 e P3 apresentaram maiores proporções da fração areia em relação ao P1 e P4. A maior proporção de silte foi observada nos horizontes 3Cukz<sub>2</sub> (515 mg kg<sup>-1</sup>) e 9Cuk<sub>8</sub> (575 mg kg<sup>-1</sup>) do P1. A maior proporção da fração argila também foi encontrado em P1 no horizonte 5Cukz<sub>4</sub> (461 mg kg<sup>-1</sup>). A quantidade de argila nos tecnossolos reduziu na ordem: P1 > P4 > P2 > P3 (Tabela 2).

Em relação à fração fina, a argila dispersa em água (ADA) apresentou ausência de dispersão da argila em todos os perfis de tecnossolos, resultando em grau de floculação (GF) dos horizontes iguais a 100 % (Tabela 2). A maior (5,02) e a menor (0,44) relação silte/argila foi observada em P4 nos horizontes Auk e Cuk<sub>1</sub>, respectivamente (Tabela 2).

A densidade do solo (Ds) em P1 variou de 1,13 kg dm<sup>-3</sup> a 1,41 kg dm<sup>-3</sup>; em P2 de 1,40 kg dm<sup>-3</sup> a 1,59 kg dm<sup>-3</sup>; em P3 de 1,31 kg dm<sup>-3</sup> a 1,38 kg dm<sup>-3</sup> e P4 de 1,47 kg dm<sup>-3</sup> a 1,81 kg dm<sup>-3</sup>. O tecnossolo com 40 anos (P4) apresentou maiores Ds e Dp (densidade de partícula) quando comparado com os demais perfis.

**Tabela 1.** Atributos morfológicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência de 40 anos no semiárido brasileiro

Horizontes		Cor	Mosqueado	Granulometria		Estrutura	
Simb.	Prof. (cm)	(úmida)	(úmida)		Grau	Tamanho	Forma
<b>Perfil 1 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (2 anos)</b>							
Auk	0-7	7,5YR 4/3	Ausente	F-A	Fr./ Fr.	peq/méd	Gran/ bl. sub
2Cukz <sub>1</sub>	7-15.	7,5YR 5/3	Ausente	Franco-argilosa	Fr.	peq/méd	Laminar
3Cukz <sub>2</sub>	15-25	7,5YR 5/3	Ausente	Franco-argilosa-siltoso	Fr.	peq/méd	Laminar
4Cukz <sub>3</sub>	25-30	5Y 6/1	Ausente	F	Fr.	peq/méd	Laminar
5Cukz <sub>4</sub>	30-46	7,5YR 5/3	Ausente	Arg.	Fr.	peq/méd	Laminar
6Cuk <sub>5</sub>	46-56	2,5Y 7/3	Ausente	F-Arg.A	Fr.	peq/méd	Laminar
7Cuk <sub>6</sub>	56-66	10YR 5/4	Ausente	Franco argilosa	Fr.	peq/méd	Laminar
8Cukz <sub>7</sub>	66-70	5Y 7/2	Ausente	Franco-siltosa	Fr.	peq/méd	Laminar
9Cuk <sub>8</sub>	70-98	10YR 6/3	10R 4/6	Franco-siltosa	Fr.	peq/méd	Laminar
10Cuk <sub>9</sub>	98-150+	5Y 7/2	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Laminar
<b>Perfil 2 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (5 anos)</b>							
Auk <sub>1</sub>	0-5	10YR 4/1	Ausente	F-A	Fr./ mod	peq/méd	bl. sub
Auk <sub>2</sub>	5-14.	10YR 7/2	Ausente	F-A	Fr./ mod	peq/méd	bl. sub
2Cuk <sub>1</sub>	14-22	7,5YR 5/3	Ausente	Areia-franca	Fr.	peq/méd	Laminar
3Cukz <sub>2</sub>	22-43	10YR 6/3	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Laminar
4Cukz <sub>3</sub>	43-54	7,5Y 5/3	Ausente	Franco-argilosa	Fr./ mod	méd	Laminar
5Cuk <sub>4</sub>	54-86	10YR 7/2	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Laminar
6Cuk <sub>5</sub>	86-120	10YR 6/3	Ausente	Areia-franca	Fr.	peq/méd	Laminar
7Cuk <sub>6</sub>	120-150+	2,5Y 6/2	Ausente	Areia-franca	Fr.	peq/méd	Laminar

Continua...

**Tabela 1.** Atributos morfológicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência de 40 anos no semiárido brasileiro

Horizontes		Cor	Mosq.	Granulometria		Estrutura	
Simb.	Prof. (cm)	(úmida)	(úmida)		Grau	Tamanho	Forma
<b>Perfil 3 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (10 anos)</b>							
Auk	0-9	7,5YR 5/3	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Bl. Subangular
2Cuk <sub>1</sub>	9-15.	2,5Y 7/2	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Laminar
3Cuk <sub>2</sub>	15-40	2,5Y 7/1	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Laminar
4Cuk <sub>3</sub>	40-64	10YR 6/3	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Laminar
5Cukz <sub>4</sub>	64-70	7,5YR 4/3	Ausente	F	Fr./mod	peq/méd	Laminar
6Cukz <sub>5</sub>	70-87	7,5YR 6/3	Ausente	Areia-franca	Fr.	peq/méd	Laminar
7Cuk <sub>6</sub>	87-105	7,5YR 5/3	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Laminar
8Cuk <sub>7</sub>	105-150+	10YR 5/4	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	Laminar
<b>Perfil 4 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic) (40 anos)</b>							
Auk	0-10	7,5YR 4/3	Ausente	F-A	Fr./ mod	peq/méd	bl. sub / bl. sub
Cuk <sub>1</sub>	1-23.	7,5YR 5/3	Ausente	Areia-franca	Fr.	peq/méd	bl. sub
Cuk <sub>2</sub>	23-33	10YR 5/3	Ausente	F-A	Fr./ mod	peq/méd	Bl. Subangular
2Cuk <sub>1</sub> /Cuk <sub>2</sub>	33-88	7,5YR 4/3	Ausente	Franco-argilosa	Mod /Forte	méd/gr	bl. sub / bl. ang
3Cukz	88-150+	10YR 6/3	Ausente	F-A	Fr.	peq/méd	bl. sub
<b>T0 (Tempo zero)</b>							
T0	-	-	-	F-A	-	-	-

(Símb.) – Símbolo; (Prof) - Profundidade; (Mosq) – Mosqueados; (Fr).-Frac; (mod).- moderada; (peq).- pequena; (méd).-média; (bl. sub.)- bloco subangular; (gran) – granular; (gr) – grande; (bl. ang.) - Bloco angular; (Arg.)- Argila; (F-A) - Francoarenosa; (Arg.A) – (F) – Franca;

**Tabela 2.** Atributos físicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência de 40 anos no semiárido brasileiro

Símb.	Horizontes Prof. (cm)	Casc. (20 – 2 mm) (%)	Composição granulométrica da TFSA (g kg <sup>-1</sup> )					A.D.A. (g kg <sup>-1</sup> )	G.F. (%)	Densidade (kg dm <sup>-3</sup> )		P. (%)	
			A.T. (2-0,05 mm)	A.G. (0,2-2 mm)	A.F. (0,05-0,2 mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)			Silte/Argila	Solo		Partíc.
<b>Perfil 1 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (2 anos)</b>													
Auk	0-7	0	683	62	621	194	122	0	100	1,59	1,13	2,48	54
2Cukz <sub>1</sub>	7-15	0	171	15	156	444	385	0	100	1,15	1,31	2,38	45
3Cukz <sub>2</sub>	15-25	0	98	8	90	515	386	0	100	1,33	1,28	2,12	40
4Cukz <sub>3</sub>	25-30	0	380	14	366	449	172	0	100	2,62	1,36	2,67	49
5Cukz <sub>4</sub>	30-46	0	157	7	150	382	461	0	100	0,83	1,34	2,54	47
6Cuk <sub>5</sub>	46-56	0	459	50	409	216	326	0	100	0,66	1,41	2,41	42
7Cuk <sub>6</sub>	56-66	0	375	46	330	324	300	0	100	1,08	1,25	2,52	50
8Cukz <sub>7</sub>	66-70	0	335	27	308	494	171	0	100	2,89	1,27	2,42	48
9Cuk <sub>8</sub>	70-98	0	154	11	143	572	274	0	100	2,09	1,26	2,55	51
10Cuk <sub>9</sub>	98-150+	0	720	61	660	184	95	0	100	1,93	1,41	2,70	48
<b>Perfil 2 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (5 anos)</b>													
Auk <sub>1</sub>	0-5	0	774	115	660	147	79	0	100	1,85	1,44	2,56	44
Auk <sub>2</sub>	5-14	0	749	90	659	172	79	0	100	2,17	1,42	2,81	49
2Cuk <sub>1</sub>	14-22	0	826	234	592	70	105	0	100	0,67	1,40	2,93	52
3Cukz <sub>2</sub>	22-43	0	627	58	570	218	155	0	100	1,40	1,52	2,57	41
4Cukz <sub>3</sub>	43-54	0	388	40	348	277	335	0	100	0,83	1,59	2,57	38
5Cuk <sub>4</sub>	54-86	0	753	58	694	168	79	0	100	2,12	1,55	2,57	40
6Cuk <sub>5</sub>	86-120	0	843	51	792	78	79	0	100	0,98	1,44	2,85	50
7Cuk <sub>6</sub>	120-150+	0	789	45	743	132	79	0	100	1,66	1,46	2,83	48

Continua...



**Tabela 2.** Atributos físicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência de 40 anos no semiárido brasileiro

Horizontes	Símb.	Prof. (cm)	Casc. (20 – 2 mm) (%)	Composição granulométrica da TFSA (g kg <sup>-1</sup> )					G.F. (%)	Densidade (kg dm <sup>-3</sup> )		P. (%)	
				A.T. (2-0,05 mm)	A.G. (0,2-2 mm)	A.F. (0,05-0,2 mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)		A.D.A. (g kg <sup>-1</sup> )	Silte/Argila		Solo
<b>Perfil 3 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (10 anos)</b>													
Auk	0-9	0	651	49	603	218	131	0	100	1,67	1,34	2,49	46
2Cuk <sub>1</sub>	9-15	0	642	10	632	279	79	0	100	3,53	1,38	2,79	51
3Cuk <sub>2</sub>	15-40	0	744	31	713	177	79	0	100	2,24	1,38	2,85	52
4Cuk <sub>3</sub>	40-64	0	745	27	718	125	130	0	100	0,97	1,38	2,59	47
5Cukz <sub>4</sub>	64-70	0	468	5	463	401	131	0	100	3,06	1,32	2,66	50
6Cukz <sub>5</sub>	70-87	0	812	56	757	108	80	0	100	1,36	1,37	2,24	39
7Cuk <sub>6</sub>	87-105	0	694	85	609	227	80	0	100	2,85	1,31	2,65	51
8Cuk <sub>7</sub>	105-150+	0	670	20	651	251	79	0	100	3,16	1,33	2,83	53
<b>Perfil 4 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic) (40 anos)</b>													
Auk	0-10	0	576	105	471	354	71	0	100	5,02	1,47	2,71	46
Cuk <sub>1</sub>	10-23	0	863	441	421	42	96	0	100	0,44	1,59	3,03	48
Cuk <sub>2</sub>	23-33	4,91	567	250	320	284	149	0	100	0,87	1,81	2,78	35
2Cuk <sub>1</sub> /Cuk <sub>2</sub>	33-88	0	349	112	237	264	387	0	100	0,68	1,73	2,63	34
3Cukz	88-150+	2,92	744	303	443	135	121	0	100	1,10	1,64	2,74	40
<b>T0 (Tempo zero)</b>													
T0	-	0	762	128	635	67	171	0	100	0,40	-	2,91	-

(Símb.) - Símbolo; (Prof) - Profundidade; (Casc.) – Cascalho; (A.T) – Areia Total; (A.G.) – Areia Grossa; (A.F) – Areia Fina; (A.D.A.) Argila Dispersa em Água; (G.F) – Grau de Flocculação; Partíc. (Partícula); (P) – Porosidade.

## 4.2 Atributos químicos

Os atributos químicos dos quatro perfis de tecnossolos ao longo da cronosequência de 40 anos estão descritos na Tabela 3. O pH em água foi superior aos obtidos na extração com KCl nos quatro perfis, sendo predominantemente alcalinos. Logo, todos os tecnossolos apresentaram valores negativos de  $\Delta\text{pH}$ , variando de -0,5 a -1,5 (P1), -0,4 a -0,7 (P2), -0,4 a -1,0 (P3), -0,4 a -1,4 (P4).

Dentre os cátions trocáveis,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  apresentaram as maiores concentrações, com distribuição desuniforme em todos os perfis. O tecnossolo com 2 anos (P1) possui concentrações superiores desses cátions em comparação aos demais perfis analisados, com maior valor de  $\text{Ca}^{2+}$  ( $33,52 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) e  $\text{Mg}^{2+}$  ( $9,66 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) no horizonte 3Cukz<sub>2</sub> (Tabela 3).

O tecnossolo mais jovem (P1, 2 anos) apresentou as maiores concentrações de  $\text{Na}^+$  ao longo do perfil. Os horizontes 3Cukz<sub>2</sub>, 2Cukz<sub>1</sub> e Auk obtiveram as maiores concentrações de  $\text{Na}^+$ , respectivamente (Tabela 3). As maiores concentrações de  $\text{K}^+$  foram evidenciadas nos horizontes superficiais dos tecnossolos, com redução em profundidade, exceto no tecnossolo de 5 anos (P2), em que a maior concentração desse cátion foi observada no horizonte 2Cuk<sub>1</sub>.

A presença do  $\text{Al}^{3+}$  é inexpressiva ao longo dos perfis de tecnossolos quando comparado aos demais cátions, refletindo na ausência de saturação por  $\text{Al}^{3+}$ . A Acidez potencial (H+Al) apresentou maiores valores em P3 e P4, principalmente nos horizontes Auk de ambos os perfis. Quanto mais antigo o tecnossolo, maior foi a H+Al, aumentando na seguinte ordem: P1 < P2 < P3 < P4 (Tabela 3). A CTC e a SB apresentaram distribuição desuniforme em todos os tecnossolos da cronosequência (Tabela 3). Os valores de CTC e SB nos perfis P1, P2, P3 e P4 variaram de 6,22 a 44,38  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , 4,72 a 28,16  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , 4,50 a 17,13  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e 7,13 a 33,53  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , respectivamente.

A atividade de argila foi considerada alta em todos os perfis de tecnossolos, correspondendo a valores superiores a 27  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de argila. O P1 apresentou maiores valores de atividade de argila em superfície e menores valores em profundidade em relação aos tecnossolos mais antigos. Em contraste, o P3 apresentou redução da atividade de argila em profundidade. O P2 e P4 apresentaram distribuição desuniforme da atividade de argila ao longo dos perfis (Tabela 3). Todos os horizontes de P1, P2, P3 e P4 apresentaram baixos teores de saturação por sódio (PST <15%), não sendo constatado em nenhum dos perfis o caráter sódico nem solódico.

As concentrações de fósforo disponível extraído por Mehlich-1 (P-disp.) e o fósforo obtido pelo extrator Olsen (P-Olsen) apresentaram variações significativas ao longo de cada

perfil, assim como entre os tecnossolos da cronossequência. As maiores concentrações de P disp. foram encontradas no P4, variando de 61,61 mg kg<sup>-1</sup> a 23,95 mg kg<sup>-1</sup> e menor em P2, variando de 0,72 mg kg<sup>-1</sup> a 0,77 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 3). A maior concentração de P-Olsen (12,11 mg kg<sup>-1</sup>) foi encontrada no horizonte superficial (Auk) do P4. Nesse mesmo perfil, pode-se observar redução acentuada no valor deste elemento nas demais profundidades, sendo encontrado no horizonte 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> a menor concentração (0,05 mg kg<sup>-1</sup>). Nos perfis P1 (2 anos) e P2 (5 anos) as concentrações disponíveis de P foram superiores quando extraídos pelo extrator Olsen, exceto nos horizontes 2Cuk<sub>1</sub>, 4Cukz<sub>3</sub> e 5Cuk<sub>4</sub> do P2. Em contraste, nos perfis P3 (10 anos) e P4 (40 anos), as concentrações disponíveis de P foram superiores quando extraídos pelo extrator Mehlich-1, com exceção do horizonte 2Cuk<sub>1</sub> do P3.

As concentrações de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) foram elevadas em todos os perfis de tecnossolos. P1, P2 e P3 apresentaram concentrações semelhantes com aproximadamente 124 g kg<sup>-1</sup> ao longo do perfil. A mesma concentração foi encontrada no rejeito recém exposto (T0) (124,94 g kg<sup>-1</sup>). As concentrações de CaCO<sub>3</sub> em P4 variou de 114,75 a 124,88 g kg<sup>-1</sup>. As menores concentrações de CaCO<sub>3</sub> (114,75 e 115,22 g kg<sup>-1</sup>) foram observadas nos horizontes superficiais Auk e Cuk<sub>1</sub> do P4 (40 anos), respectivamente. Já as maiores concentrações foram observadas em maior profundidade nos horizontes Cuk<sub>2</sub> (124,88 g kg<sup>-1</sup>), 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (120,44 g kg<sup>-1</sup>) e 3Cukz (124,88 g kg<sup>-1</sup>).

O carbono orgânico (CO) apresentou distribuição desuniforme ao longo de todos os tecnossolos (Tabela 3), obtendo as maiores concentrações em superfície. Observou-se também que, ao longo da cronossequência, a concentração de CO aumentou nos horizontes superficiais dos tecnossolos: 15,70 g kg<sup>-1</sup> (Auk do P1 com 2 anos) > 23,84 g kg<sup>-1</sup> (Auk<sub>1</sub> do P2 com 5 anos) > 41,57 g kg<sup>-1</sup> (Auk do P3 com 10 anos) > 67,77 g kg<sup>-1</sup> (Auk do P4 com 40 anos). P1, P2 e P3 apresentaram concentrações de CO > 1% e P4 > 5%. O estoque de carbono (EC), de forma semelhante, apresentou maior acúmulo em superfície, ao longo da cronossequência (Tabela 3).

Os Perfis P1, P2, P3 e P4 apresentaram horizontes com caráter salino devido à condutividade elétrica (CE) ser maior do que 4 dS m<sup>-1</sup> e a porcentagem de sódio trocável (PST) ser menor do que 15%. O P3 apresentou o horizonte de maior (5Cukz<sub>4</sub> – 8,43 dS m<sup>-1</sup>) e menor (2Cuk<sub>1</sub> – 0,41 dS m<sup>-1</sup>) CE. Os perfis P1, P2, P3 e P4 apresentaram distribuição desuniforme de CE, variando de 1,08 a 5,56 dSm<sup>-1</sup>, 1,17 a 5,78 dSm<sup>-1</sup>, 0,41 a 8,43 dSm<sup>-1</sup> e 0,53 a 6,1 dSm<sup>-1</sup> respectivamente. Os valores de PST nos tecnossolos também foram desuniformes em profundidade, variando de 2,40 a 3,5 %, 0,36 a 3,24 %, 0,85 a 2,63 % e 0,85 a 2,63 % no P1, P2, P3 e P4, respectivamente.

O rejeito recém exposto a céu aberto, que não passou por processo de formação do solo, representado pelo tempo zero (T0), apresentou pH alcalino, tanto em água quanto em KCl, seguindo a mesma tendência dos perfis de tecnossolos ao longo da cronossequência (pH em H<sub>2</sub>O > pH em KCl). As concentrações de Ca<sup>2+</sup> (5,29 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) e Mg<sup>2+</sup> (1,35 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) foram elevadas, enquanto o K<sup>+</sup> foi muito baixo (0,05 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>). Não foram observadas concentrações de Al<sup>3+</sup> no T0. O valor obtido na SB e CTC (6,91 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) teve maior contribuição do Ca<sup>2+</sup> (5,29 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>). A atividade de argila foi alta (40,55 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>), superior a 27 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. A PST e a CE foram inferiores a 15% e 4 dSm<sup>-1</sup>, respectivamente. O T0 apresentou concentração elevada de P disponível quando extraído pelo Mehlich-1 (16,70 mg kg<sup>-1</sup>) e baixa quando extraído pelo extrator Olsen (0,44 mg kg<sup>-1</sup>). Os valores de Fe<sub>o</sub> (0,63g kg<sup>-1</sup>) foi menor que o Fe<sub>d</sub> (8,96 g kg<sup>-1</sup>) A relação Fe<sub>o</sub>/ Fe<sub>d</sub> observada foi de 0,07.

A maior concentração de Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>, quando comparado com os demais perfis, foi observada no horizonte superficial Auk (125,2 g kg<sup>-1</sup>) do P1 (Tabela 4). Em P1, houve redução de Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> em profundidade, com a menor concentração no horizonte 10Cuk<sub>9</sub> (36,6 g kg<sup>-1</sup>). Os valores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> em P2, P3 e P4 apresentaram distribuição desuniforme ao longo dos perfis, variando de 42,0 a 83,9 g kg<sup>-1</sup>, 52,0 a 66,6 g kg<sup>-1</sup>, 61,5 a 75,9 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. As maiores concentrações de Fe<sub>d</sub> foram encontradas nos horizontes superficiais do P1 (Auk, 2Cuk<sub>1</sub> e 3Cuk<sub>2</sub>), com concentrações de 42,46g kg<sup>-1</sup>, 22,50 g kg<sup>-1</sup> e 27,34 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Em geral, as concentrações de Fe<sub>d</sub> reduziram em profundidade (Tabela 4), com exceção do P2 que apresentou menores concentrações em superfície (Auk<sub>1</sub> = 2,48g kg<sup>-1</sup>, Auk<sub>2</sub> = 2,25 g kg<sup>-1</sup>) e do P4 que apresentou a maior concentração no horizonte 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (30,13 g kg<sup>-1</sup>).

Os valores de Fe<sub>o</sub> reduziram em profundidade nos perfis P1, P2 e P3. Já no perfil P4, houve aumento da concentração de Fe<sub>o</sub> em profundidade (Tabela 4). A maior concentração de Fe<sub>o</sub> foi observada no horizonte 9Cuk<sub>8</sub> (2,77g kg<sup>-1</sup>) do P1 e a menor no horizonte 2Cuk<sub>1</sub> (0,84 g kg<sup>-1</sup>) do P2. A relação Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> variou de 0,04 a 0,29 g kg<sup>-1</sup>, 0,05 a 0,49 g kg<sup>-1</sup>, 0,11 a 0,54 g kg<sup>-1</sup> e 0,07 a 0,23 g kg<sup>-1</sup> nos perfis P1, P2, P3 e P4, respectivamente.

**Tabela 3.** Atributos químicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência de 40 anos no semiárido brasileiro

Horizontes	pH (1:2,5)		$\Delta$ pH	Complexo Sortivo (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )									V	m	PST	P	P	CaCo <sub>3</sub>	CO	EC	CE		
	Simb./ Prof. (cm)	H <sub>2</sub> O		KCl	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup>	SB	H+Al	CTC				At.	disp.	Olsen					
					mg kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	dSm <sup>-1</sup>	Argila	%													
<b>Perfil 1 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (2 anos)</b>																							
Auk (0-7)	9,04	7,54	-1,5	13,30	3,58	0,64	0,62	0	18,14	1,68	18,14	148,34	100	0	3,50	1,40	2,31	124,81	15,70	12,42	1,08		
2Cuk <sub>z1</sub> (7-15)	8,32	7,45	-0,9	28,62	5,57	0,84	0,10	0	35,13	1,12	35,13	91,25	100	0	2,40	0,89	1,76	124,91	18,42	19,24	5,13		
3Cuk <sub>z2</sub> (15-25)	8,28	7,37	-0,9	33,52	9,66	1,09	0,11	0	44,38	0,86	44,38	115,86	100	0	2,46	0,99	3,07	124,66	24,72	31,62	5,56		
4Cuk <sub>z3</sub> (25-30)	8,68	8,00	-0,7	9,24	2,21	0,38	0,09	0	11,92	1,00	11,92	69,46	100	0	3,20	0,63	1,27	124,94	9,94	6,75	4,04		
5Cuk <sub>z4</sub> (30-46)	8,45	7,61	-0,8	19,02	4,72	0,59	0,13	0	24,46	0,94	24,46	53,03	100	0	2,43	0,51	1,25	124,94	11,83	9,52	5,06		
6Cuk <sub>5</sub> (46-56)	8,73	7,88	-0,8	10,93	2,99	0,36	0,11	0	14,39	1,01	14,39	44,18	100	0	2,52	0,45	1,47	124,94	7,56	10,63	3,09		
7Cuk <sub>6</sub> (56-66)	8,66	7,74	-0,9	13,09	3,06	0,42	0,10	0	16,67	1,18	16,67	55,47	100	0	2,51	0,78	1,67	124,88	13,08	16,40	3,08		
8Cuk <sub>z7</sub> (66-70)	8,55	8,04	-0,5	7,23	1,74	0,26	0,09	0	9,33	1,08	9,33	54,47	100	0	2,82	0,63	1,07	124,84	11,78	5,97	4,12		
9Cuk <sub>8</sub> (70-98)	8,62	7,85	-0,8	9,74	2,96	0,32	0,12	0	13,14	1,42	13,14	48,02	100	0	2,47	0,73	1,76	124,88	12,15	42,72	2,97		
10Cuk <sub>9</sub> (98-150+)	8,88	8,38	-0,5	4,79	1,17	0,18	0,08	0	6,22	1,41	6,22	65,24	100	0	2,90	1,10	2,03	124,94	8,02	58,76	2,24		
<b>Perfil 2 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (5 anos)</b>																							
Auk <sub>1</sub> (0-5)	8,77	8,54	-0,2	4,37	1,12	0,15	0,11	0	5,76	1,73	5,76	72,78	100	0	2,65	3,37	4,20	124,94	23,84	17,19	1,17		
Auk <sub>2</sub> (5-14)	8,91	8,72	-0,2	4,52	0,82	0,13	0,09	0	5,56	1,73	5,56	70,36	100	0	2,40	0,77	1,55	124,94	8,57	10,98	1,69		
2Cuk <sub>1</sub> (14-22)	8,47	8,05	-0,4	7,94	0,73	0,30	0,27	0	9,24	1,83	9,24	88,29	100	0	3,24	1,38	1,12	124,78	6,47	7,26	3,22		
3Cuk <sub>z2</sub> (22-43)	8,38	7,85	-0,5	19,90	1,07	0,19	0,07	0	21,24	1,83	21,24	136,91	100	0	0,91	0,91	1,12	124,94	7,77	24,75	4,26		
4Cuk <sub>z3</sub> (43-54)	8,35	7,68	-0,7	23,79	4,11	0,10	0,15	0	28,16	1,68	28,16	84,1	100	0	0,36	1,87	1,52	124,84	11,33	19,83	5,78		
5Cuk <sub>4</sub> (54-86)	8,72	8,27	-0,4	5,28	1,11	0,18	0,05	0	6,62	1,66	6,62	83,39	100	0	2,66	0,77	0,48	124,94	8,03	39,81	3,12		
6Cuk <sub>5</sub> (86-120)	8,77	8,38	-0,4	4,51	0,34	0,15	0,03	0	5,04	1,90	5,04	63,58	100	0	2,90	0,72	0,77	124,75	5,87	28,68	3,41		
7Cuk <sub>6</sub> (120-150) +	8,84	8,46	-0,4	4,04	0,49	0,15	0,04	0	4,72	1,74	4,72	59,48	100	0	3,24	0,86	0,87	124,84	6,03	26,36	3,38		

Horizontes	pH (1:2,5)		$\Delta$ pH	Complexo Sortivo (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )									V	m	PST	P disp.	P Olsen	CaCO <sub>3</sub>	CO	EC	CE					
				Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup>	SB	H+Al	CTC	At. Argila										%	mg kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	dSm <sup>-1</sup>
	H <sub>2</sub> O	KCl																								
<b>Perfil 3– Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (10 anos)</b>																										
Auk (0-9)	8,75	7,70	-1,0	9,06	1,94	0,10	0,46	0	11,56	2,67	11,56	88,51	100	0	0,85	5,71	4,79	124,81	41,57	50,04	0,65					
2Cuk <sub>1</sub> (9-15)	9,26	8,41	-0,9	4,17	0,17	0,11	0,04	0	4,50	1,65	4,50	56,83	100	0	2,45	0,86	1,11	124,91	9,44	7,81	0,41					
3Cuk <sub>2</sub> (15-40)	8,80	8,36	-0,4	5,76	0,57	0,12	0,05	0	6,49	2,40	6,49	81,99	100	0	1,86	0,86	0,15	124,91	7,73	26,71	2,16					
4Cuk <sub>3</sub> (40-64)	8,56	8,19	-0,4	8,30	0,98	0,25	0,06	0	9,59	2,24	9,59	73,96	100	0	2,61	10,66	0,63	124,94	8,47	27,98	3,96					
5Cuk <sub>4</sub> (64-70)	8,20	7,58	-0,6	14,00	2,61	0,42	0,10	0	17,13	2,52	17,13	130,51	100	0	2,47	1,11	0,64	122,56	20,31	16,07	8,43					
6Cuk <sub>5</sub> (70-87)	8,43	7,90	-0,5	6,53	1,40	0,20	0,06	0	8,21	2,41	8,21	103,07	100	0	2,49	2,41	0,58	124,69	12,80	29,79	4,00					
7Cuk <sub>6</sub> (87-105)	8,55	8,01	-0,5	6,19	1,69	0,21	0,06	0	8,16	2,24	8,16	102,54	100	0	2,63	3,06	0,44	124,88	9,06	21,29	3,89					
8Cuk <sub>7</sub> (105-150) +	8,63	8,19	-0,4	5,86	1,02	0,14	0,04	0	7,07	2,16	7,07	88,97	100	0	2,05	1,33	0,05	124,94	5,17	30,89	3,09					
<b>Perfil 4– Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic) (40 anos)</b>																										
Auk (0-10)	8,31	7,69	-0,6	6,63	1,51	0,36	0,43	0	8,93	3,08	8,93	126,66	100	0	4,00	61,61	12,11	114,75	67,77	99,65	1,04					
Cuk <sub>1</sub> (10-23)	9,17	7,91	-1,3	4,90	1,44	0,37	0,41	0	7,13	2,99	7,13	74,6	100	0	5,25	23,95	1,26	115,22	15,33	31,72	0,58					
Cuk <sub>2</sub> (23-33)	9,03	7,88	-1,2	7,35	1,55	0,19	0,11	0	9,20	2,24	9,20	61,55	100	0	2,04	1,56	0,40	124,88	11,18	20,22	0,53					
2Cuk <sub>1</sub> /Cuk <sub>2</sub> (33-88)	8,73	7,33	-1,4	25,68	7,23	0,49	0,13	0	33,53	2,30	33,53	86,63	100	0	1,47	2,84	0,05	120,44	15,08	143,18	0,94					
3Cuk <sub>3</sub> (88-150) +	8,38	8,00	-0,4	6,99	2,04	0,37	0,09	0	9,50	2,39	9,50	78,48	100	0	3,87	1,05	0,19	124,88	8,64	88,03	6,11					
<b>Tempo 0</b>																										
tempo 0	8,79	8,31	-0,5	5,29	1,35	0,22	0,05	0,00	6,91	1,32	6,91	40,55	100	0	3,12	16,70	0,44	124,94	7,2	-	3,16					

(Símbo.) – Símbolo; (Prof) - Profundidade; (S.B.) – Soma de Bases; (T) – Capacidade de troca de cátions a pH 7; (V) – Saturação por bases; (m) – Saturação por alumínio; Atividade de argila (At. Argila).

**Tabela 4.** Concentrações de ferro em tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronosequência de 40 anos no semiárido brasileiro

Horizontes	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>
Símb./Prof. (cm)	g kg <sup>-1</sup>			
<b>Perfil 1 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (2 anos)</b>				
Auk (0-7)	1,51	42,46	0,04	125,2
2Cukz <sub>1</sub> (7-15)	2,28	22,50	0,1	61,6
3Cukz <sub>2</sub> (15-25)	2,55	27,34	0,09	76,4
4Cukz <sub>3</sub> (25-30)	2,06	8,99	0,23	52,9
5Cukz <sub>4</sub> (30-46)	2,45	16,60	0,15	53,4
6Cuk <sub>5</sub> (46-56)	1,65	9,72	0,17	39,6
7Cuk <sub>6</sub> (56-66)	2,02	15,78	0,13	43,5
8Cukz <sub>7</sub> (66-70)	2,53	8,75	0,29	45,3
9Cuk <sub>8</sub> (70-98)	2,77	10,82	0,26	41,3
10Cuk <sub>9</sub> (98-150)+	1,39	4,76	0,29	36,6
<b>Perfil 2 – Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (5 anos)</b>				
Auk <sub>1</sub> (0-5)	1,06	2,48	0,43	45,6
Auk <sub>2</sub> (5-14)	1,12	2,25	0,49	42
2Cuk <sub>1</sub> (14-22)	0,84	15,41	0,05	83,9
3Cukz <sub>2</sub> (22-43)	1,51	15,86	0,09	67,2
4Cukz <sub>3</sub> (43-54)	2,25	23,63	0,1	71,4
5Cuk <sub>4</sub> (54-86)	1,32	6,64	0,2	48,6
6Cuk <sub>5</sub> (86-120)	1,15	6,01	0,19	55,6
7Cuk <sub>6</sub> (120-150)+	1,06	5,56	0,19	61,6
<b>Perfil 3– Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (10 anos)</b>				
Auk (0-9)	1,57	10,12	0,16	52,9
2Cuk <sub>1</sub> (9-15)	2,66	11,93	0,22	70,1
3Cuk <sub>2</sub> (15-40)	1,54	2,84	0,54	53,1
4Cuk <sub>3</sub> (40-64)	1,34	7,29	0,18	55,9
5Cukz <sub>4</sub> (64-70)	2,02	11,48	0,18	66,6
6Cukz <sub>5</sub> (70-87)	1,09	6,80	0,16	55,4
7Cuk <sub>6</sub> (87-105)	1,27	11,42	0,11	52
8Cuk <sub>7</sub> (105-150)+	1,16	7,06	0,17	55,3
<b>Perfil 4– Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic) (40 anos)</b>				
Auk (0-10)	1,01	11,07	0,09	70,8
Cuk <sub>1</sub> (10-23)	1,01	13,66	0,07	75,9
Cuk <sub>2</sub> (23-33)	1,46	13,43	0,11	61,5
2Cuk <sub>1</sub> /Cuk <sub>2</sub> (33-88)	2,62	30,13	0,09	92,5
3Cukz (88-150)+	2,16	9,24	0,23	63,5
<b>Tempo 0</b>				
Tempo 0	0,63	8,96	0,07	52,9

(Fe<sub>d</sub>) – Ferro extraído por DCB; (Fe<sub>o</sub>) – Ferro extraído por oxalato; (Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>) – Ferro total

### 4.3 Petrografia

A amostra de tactito é composta predominantemente por cristais de epidoto com inclusões, a exemplo da powellita (grãos escuros, Figuras 1a e 1b), variando de finos a grossos, sem apresentar magnetismo. O epidoto é observado nas cores verde claro, verde amarelado e quase incolor. Os cristais de powellita são marrons escuros, levemente foscos, de elevado relevo e encontram-se dispersos em meio ao vazio da lâmina. Quando observado a olho nu (seja na amostra de mão, seja a própria secção delgada fora do microscópio), a powellita é vista como um mineral pulverulento de cor amarela. Há poucas inclusões de carbonatos (Figuras 1c e 1d), pequenos cristais de vesuvianita (Figuras 1e e 1f) de cor marrom-alaranjada, isotrópicos, e presença de titanita (Figuras 1g e 1h). A composição mineralógica do tactito pode ser observada na Tabela 5.

**Tabela 5.** Composição mineralógica (%) das principais rochas exploradas na mineração de scheelita, responsáveis por gerar os rejeitos que formaram os tecnossolos

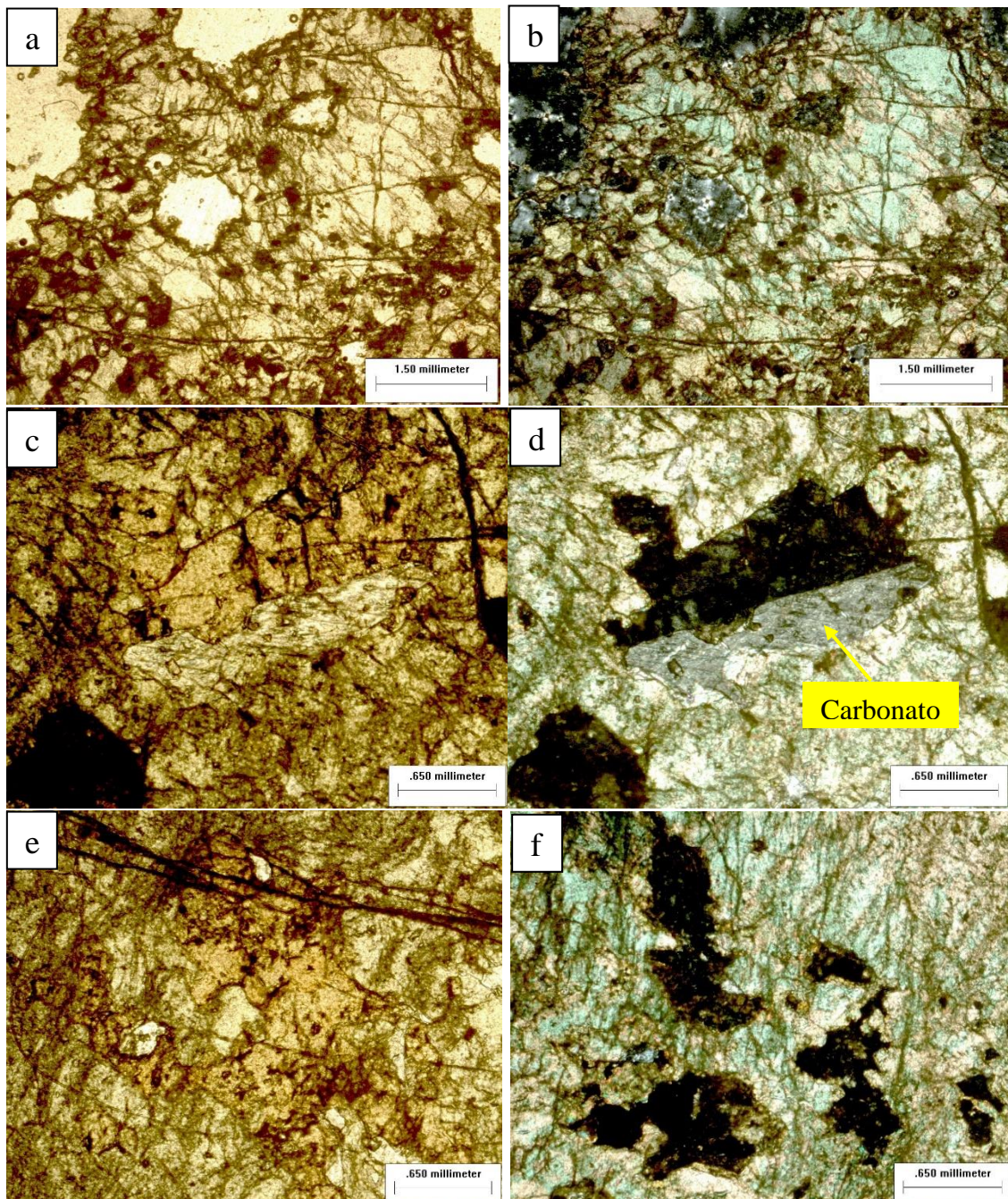
Mineral	Fórmula	Tactito	Mármore	Gnaisse
Epidoto	$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3$	91	-	-
Vesuvianita	$\text{Ca}_{10}(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_5(\text{OH,F})_4$	4	-	-
Powellita	$\text{CaMoO}_4$	3	-	-
Carbonato	$\text{CaCO}_3$	2	86	-
Tremolita-actinolita	$(\text{Ca,Na})_2(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Al})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-	10	-
Minerais opacos	-	-	3	4
Titanita	$\text{CaTiSiO}_5$	<1	1	-
Quartzo	$\text{SiO}_2$	-	-	38
Feldspato (microclina)	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	-	-	35
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH,F})_2$	-	-	17
Plagioclásio	$\text{Na,CaAl}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$	-	-	5
Apatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$	-	-	1
Total	-	100	100	100

A área da amostra de tactito a partir da qual foi confeccionada a lâmina, quando teve a superfície iluminada pelo *mineralight* (luz violeta de ondas curtas), não apresentou fluorescência. Ao passar o equipamento no restante da amostra de mão, observou-se pontos

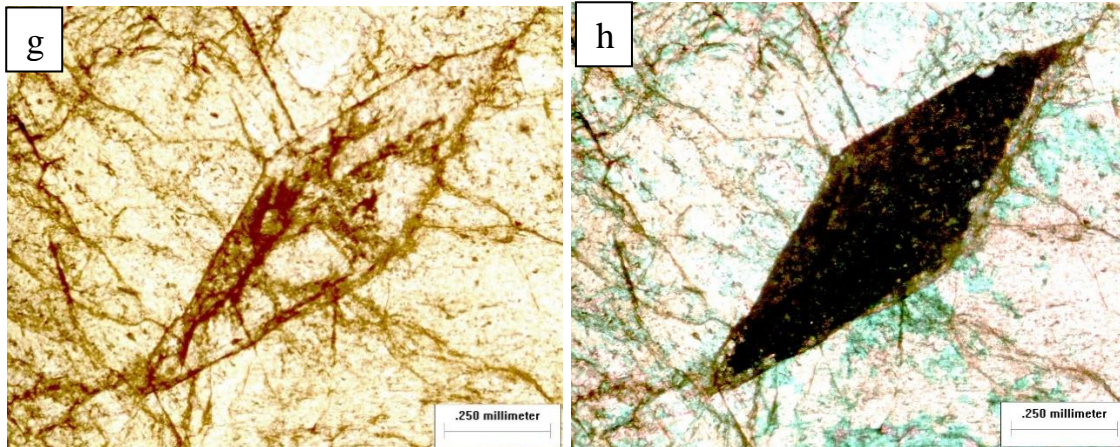


fluorescentes geralmente em cor branca e amarela; localmente há alguns pontos com fluorescências azuis. Trata-se da série  $\text{CaWO}_4 - \text{CaMoO}_4$ , ou seja, scheelita (fluorescências branca e azul) que faz solução sólida com powellita (fluorescência amarela).

**Figura 3.** Características petrográficas do tactito explorada na atividade de mineração de scheelita no semiárido brasileiro. (a) e (b) Epidoto com pequenas inclusões de powellita; (c) e (d) Carbonato; (e) e (f) Vesuvianita; (g) e (h) Titanita.



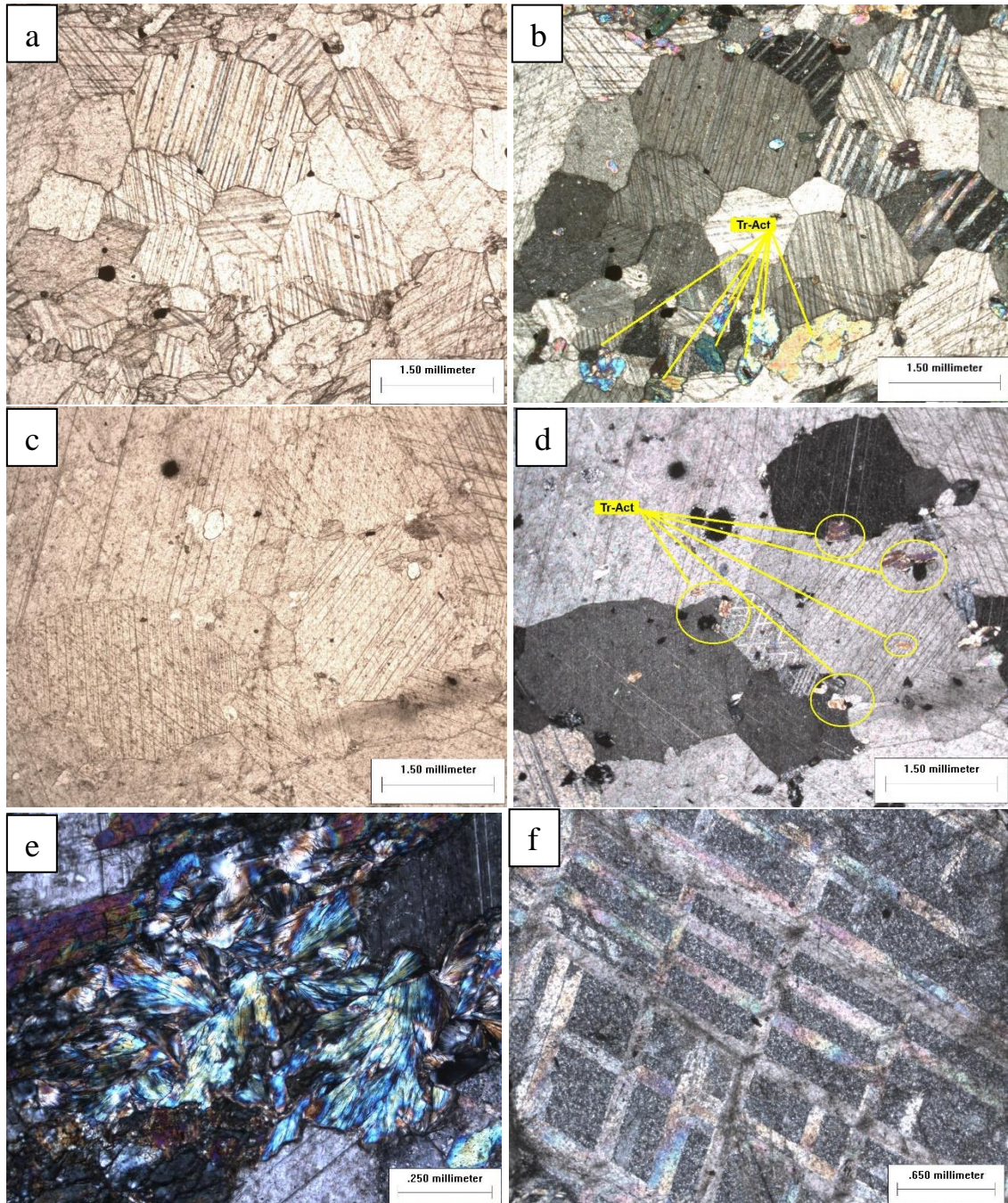




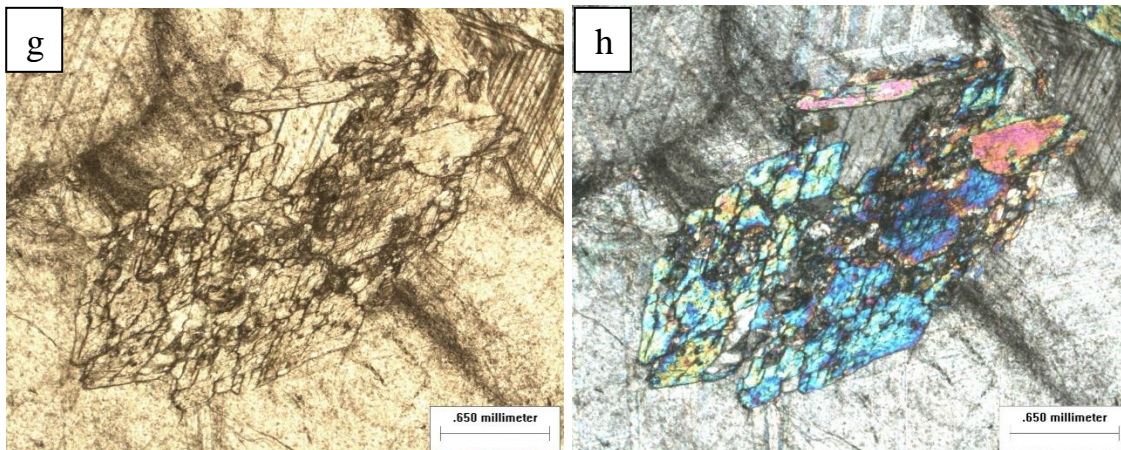
O mármore possui cor branca, com granulação média a grossa e aspecto homogêneo. A amostra não apresenta alteração, sofre pronta efervescência quando submetida a HCl a 10% a frio e não possui magnetismo. Predominam carbonatos, principalmente calcita, em meio aos quais os cristais de anfibólio se distribuem (Figuras 2a, 2b, 2c e 2d), tendendo a se concentrar em agrupamentos alongados (distribuição heterogênea). Alguns anfibólios se encontram alterados, com aspecto irregular, tendendo a fibrosos, localmente em textura radial (Figura 2e). O dobramento é fracamente marcado pelos próprios carbonatos deformados, discretamente. Parte do carbonato é calcita (Figura 2f), porém, não é possível identificar se é o único carbonato presente, pois os cristais em sua maioria não são euédricos, de modo que não é possível verificar se a geminação passa pela maior diagonal do cristal (forma de distinção de carbonatos). Nas Figuras 2g e 2h é possível observar cristais de tremolita-actinolita dispostos em textura aproximadamente radial.



**Figura 4.** Características petrográficas do mármore. (a) e (b) Aspecto geral do mármore com textura poligonal, formada pelos minerais de calcita, tremolita-actinolita (Tr-Act) e poucos minerais opacos; (c) e (d) aspecto geral com destaque para os pequenos cristais de anfibólio (Tr-Act); (e) e (f) cristais de tremolita-actinolita dispostos em textura aproximadamente radial; (g) e (h) cristais euédricos de tremolita-actinolita.



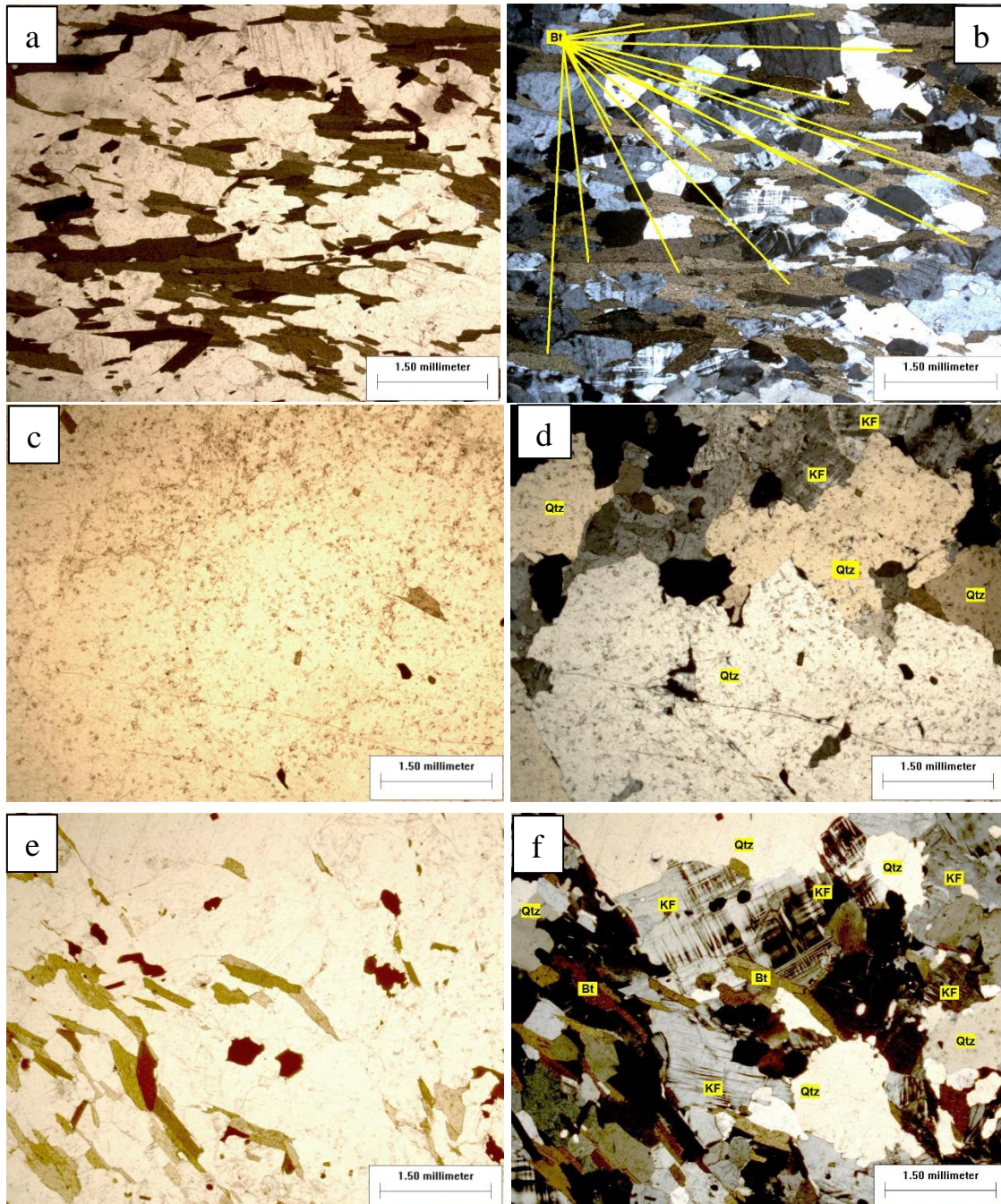




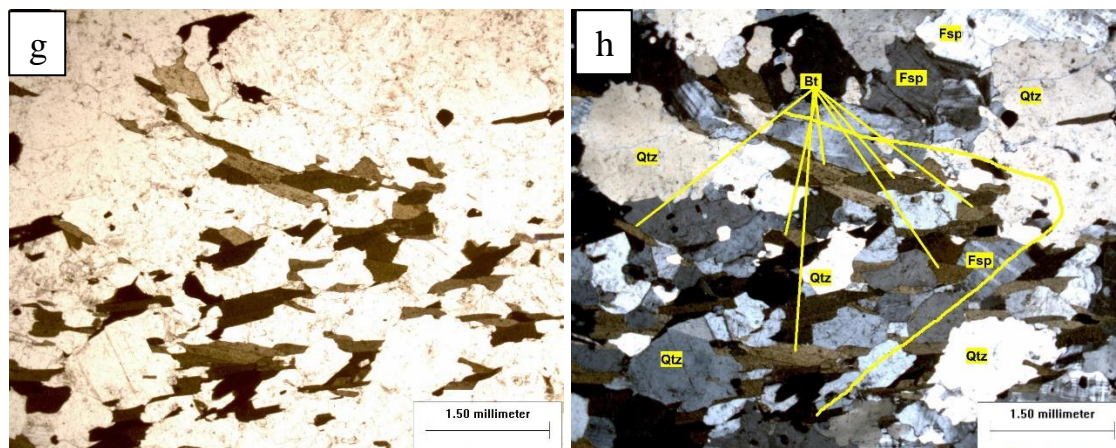
O gnaiss apresenta forte orientação, marcada por alinhamento de biotitas (formando folhas/planos micáceos), e por grossos cristais de quartzos alongados/fitas de quartzo (Figuras 3a e 3b). Essas características são indícios de que a rocha original tinha textura porfirítica e que os cristais grossos agora se encontram recristalizados. Em alguns locais, o quartzo (Qtz) ocorre em granulação grossa (Figura 3c). Na parte superior da Figura 2d é possível identificar alguns cristais de feldspato potássico com menor granulação. Os minerais máficos ocorrem entre os félsicos, estes predominando. O gnaiss não apresentou magnetismo.

O gnaiss é formado predominantemente por quartzo, feldspato do tipo microclina e biotita. Na Figura 2f observa-se cristais de microclina com sua típica geminação xadrez (Figura 3f). A deformação sofrida pela amostra levou a biotita a se alinhar e agrupar em níveis e estes sofreram dobramento, embora não muito bem definidos. O dobramento é mais bem observado por meio da marcação feita por biotitas (Figura 2h). Minerais opacos podem ser identificados na Figura 2g (cor preta). O gnaiss sofreu quebra e recristalização dinâmica, que não chegou a ser completada. Assim, ainda há extinção ondulante e subgrãos que não chegaram a se individualizar por completo.

**Figura 5.** Características petrográficas do gnaiss. (a) e (b) Aspecto geral do gnaiss com destaque para faixa enriquecida em biotita (bt); (c) e (d) aspecto geral do gnaiss com destaque em alguns locais onde o quartzo (Qtz) ocorre em granulação grossa. Na parte superior se observa alguns cristais de feldspato potássico (KF), em menor granulação; (e) e (f) aspecto geral do gnaiss com destaque para os cristais de microclina com típica geminação xadrez; (g) e (h) Presença de dobramento no gnaiss, observado por meio da marcação feita por biotitas. Encontram-se presentes na imagem outros minerais formadores: quartzo (Qtz), feldspato (Fsp) e minerais opacos.







#### 4.4 Atributos Mineralógicos

##### 4.4.1 Mineralogia das Frações areia fina e grossa

Os resultados dos difratogramas das frações areia fina e grossa estão apresentados na Figura 6. No perfil de tecnossolo com dois anos (P1) foi possível identificar a presença dos seguintes minerais: biotita, talco, feldspato, quartzo e actinolita. Os picos de difração da biotita podem ser identificados em 1,018 nm, 0,507 nm, 0,200 nm e 0,154 nm. A presença do talco foi observada mediante picos em 0,934 nm e 0,920 nm. Feldspatos foram identificados com picos em 0,676 nm, 0,27 nm, 0,336 nm e 0,235 nm. No horizonte superficial (Auk) foi observado os picos de maiores intensidades de feldspato. O quartzo foi identificado observando os picos em 0,434 nm, 0,427 nm e 0,338 nm. A presença de actinolita, mineral pertencente ao grupo dos Anfibólios, foi observada apenas no horizonte 5Cuk<sub>z4</sub>, apresentando pico em 0,851 nm.

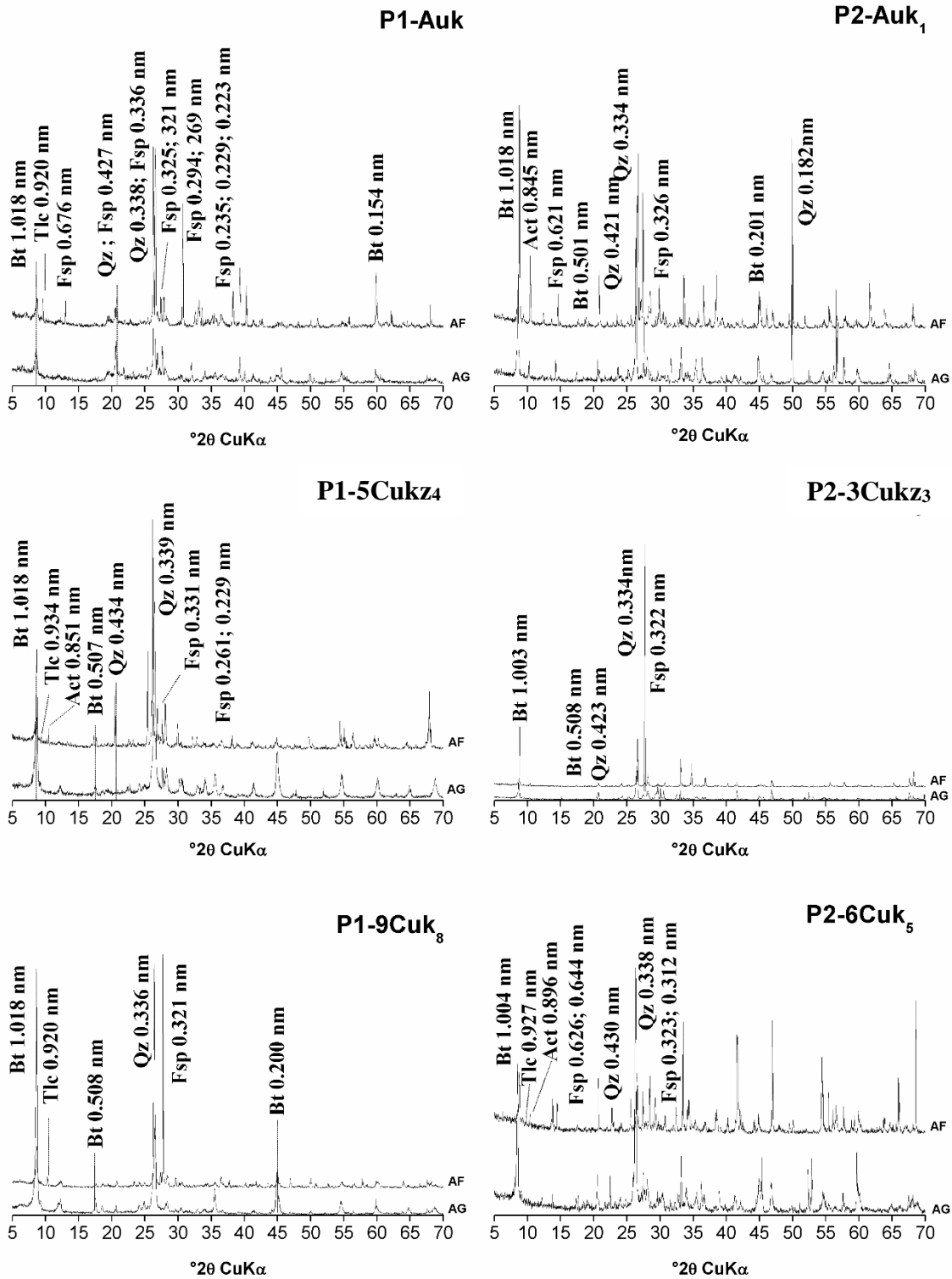
No tecnossolo com 5 anos (P2) foi observado semelhança na composição mineralógica da fração areia fina e grossa em relação ao P1, diferindo apenas na distribuição desses minerais dentro do perfil (Figura 6). O P2 apresentou actinolita no horizonte superficial (Auk) com pico de 0,845 nm e no horizonte mais profundo (6Cuk<sub>5</sub>) com pico de 0,896 nm, sendo este de maior intensidade. O mineral talco apresentou pico de difração apenas no horizonte 6Cuk<sub>5</sub> com pico em 0,927 nm. Foram identificados picos de biotita, quartzo e feldspato em todos os horizontes do P2. Nota-se que o horizonte 3Cuk<sub>z3</sub> apresentou menor presença de minerais difratados nas frações areia fina e grossa que os demais horizontes do P2.

No P3 e P4 (Figura 7), a fração areia fina e grossa analisadas também apresentaram padrões semelhantes aos perfis de tecnossolos mais jovens (Figura 6), descritos anteriormente (P1 e P2). A presença de biotita, quartzo e feldspato foi observada em todos os horizontes/camadas dos perfis analisados. Os perfis P3 e P4 apresentaram picos de mesma intensidade para o talco (0,927 nm) e actinolita (0,862 nm) nos horizontes superficiais (Auk). Nos horizontes intermediários, foi observada a presença da actinolita com pico em 0,851 nm

no P3 e 0,856 nm no P4, não sendo identificado esse mineral nos horizontes analisados em maior profundidade no P3 (7Cuk<sub>6</sub>) e P4 (3Cukz). A presença do talco foi observada apenas nos horizontes superficiais em P3 e P4.

Os difratogramas das frações areia grossa e fina do material de origem formador dos tecnossolos (T0) são observados na Figura 8. Os minerais identificados na amostra foram: biotita com pico em 1,018 nm, actinolita com pico em 0,862 nm, quartzo com os picos em 0,427 nm e 0,336nm e feldspato com os picos em 0,427 nm, 0,294 nm e 0,269 nm. Com exceção do talco, a composição mineralógica do material formador na fração areia grossa e fina (Figura 8) se assemelha às observadas nos perfis de tecnossolos em estudo (Figuras 6 e 7).

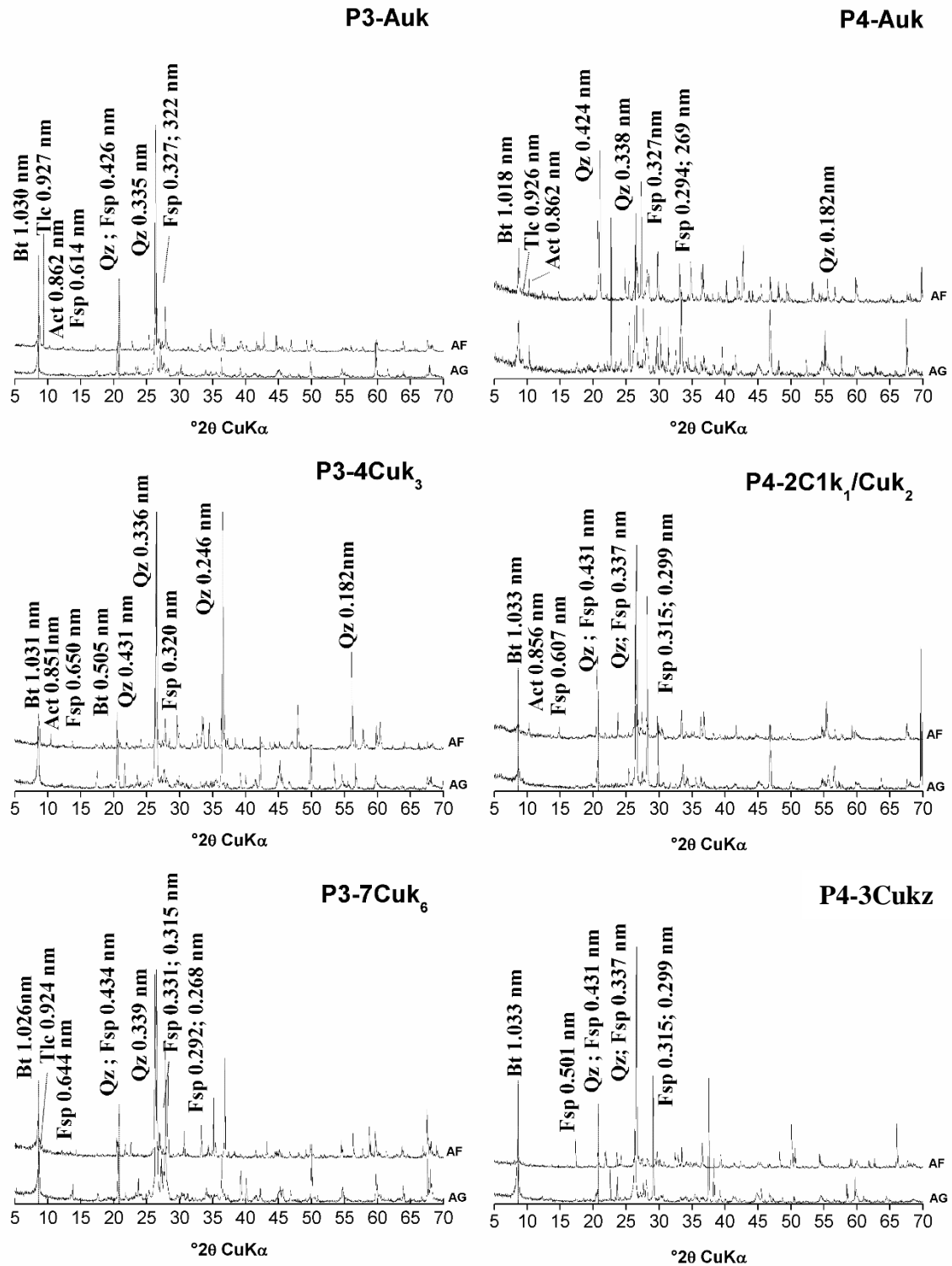
**Figura 6.** DRX da fração areia fina e grossa analisados na forma de pó não orientado nos perfis de tecnossolos com dois anos (P1) e cinco anos (P2).



AF: areia fina; AG: areia grossa; Bt: biotita; Tlc: talco; Fsp: feldspatos; Qz: quartzo; Act: actinolita.

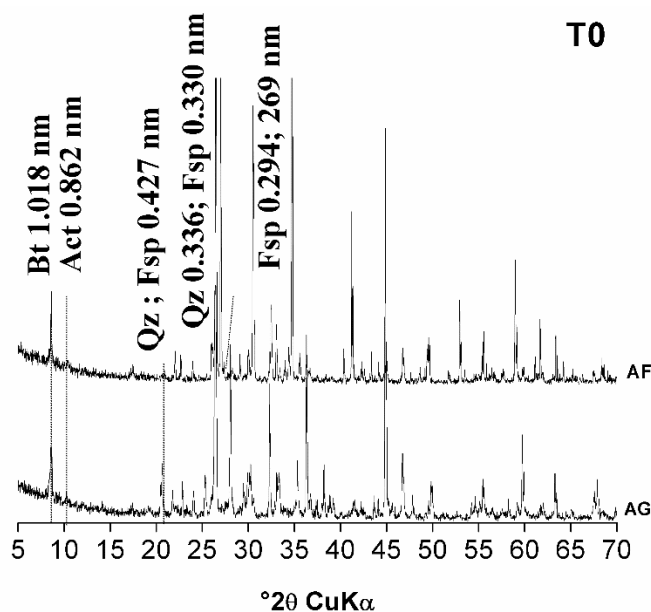


**Figura 7.** DRX da fração areia fina e grossa analisados na forma de pó não orientado nos perfis de tecnossolos com dez anos (P3) e quarenta anos (P4).



AF: areia fina; AG: areia grossa; Bt: biotita; Tlc: talco; Fsp: feldspatos; Qz: quartzo; Act: actinolita.

**Figura 8.** DRX da fração areia fina e grossa analisados na forma de pó não orientado no material de origem formador dos tecnossolos.



AF: areia fina; AG: areia grossa; Bt: biotita; Fsp: feldspatos; Qz: quartzo; Act: actinolita.

#### 4.4.2 Mineralogia da fração argila

A fração argila foi analisada na forma de pó não orientado e na forma de microagregados orientados sobre lâminas de vidro. Os resultados da mineralogia na fração argila, na forma de pó não orientado, apresentaram os seguintes minerais: esmectita, biotita, actinolita, caulinita, goethita e feldspato (Figura 10). Em P1, para os três horizontes analisados (Auk, 5Cuk<sub>4</sub> e 9Cuk<sub>8</sub>), foi possível identificar a presença de esmectita com pico em 1,50 nm, biotita com pico em 1,06 nm e 0,15 nm, actinolita com pico em 0,84 nm e 0,25 nm, caulinita com pico em 0,72 nm, goethita com pico em 0,42 nm e 0,24 nm e feldspato apresentando pico em 0,36 nm, 0,33 nm e 0,31nm.

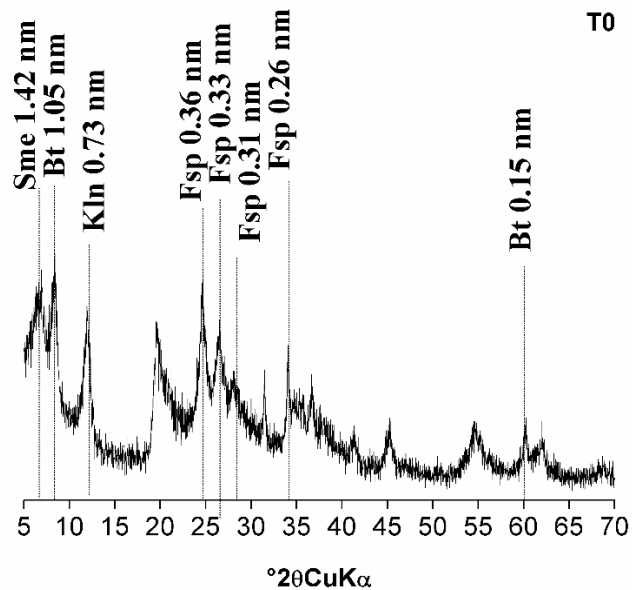
Nos horizontes Auk<sub>1</sub> e 6Cuk<sub>5</sub> do P2 foi possível observar a presença de esmectita com pico em 1,47 nm, biotita com pico em 1,05 nm, actinolita com pico em 0,86 nm e 0,20 nm, caulinita com pico em 0,73 nm e feldspato (0,36 nm). A goethita apresentou pico especificamente no horizonte 6Cuk<sub>5</sub> com pico em 0,24nm (Figura 10).

Os perfis P3 e P4, apresentaram padrões semelhantes ao P1 e P2, contudo, não foi observada a presença de actilonita nas amostras representativas desses dois perfis. Foi identificada a presença de biotia, caulinita, feldspato e goethita com picos em 1,05 nm, 0,73 nm, 0,36 e 0,33 nm e 0,24 nm, respectivamente, para ambos os perfis. O P3 apresentou

esmectita com pico em 1,43 nm, sendo este de maior intensidade que o P4 com pico em 1,32 nm (Figura 10).

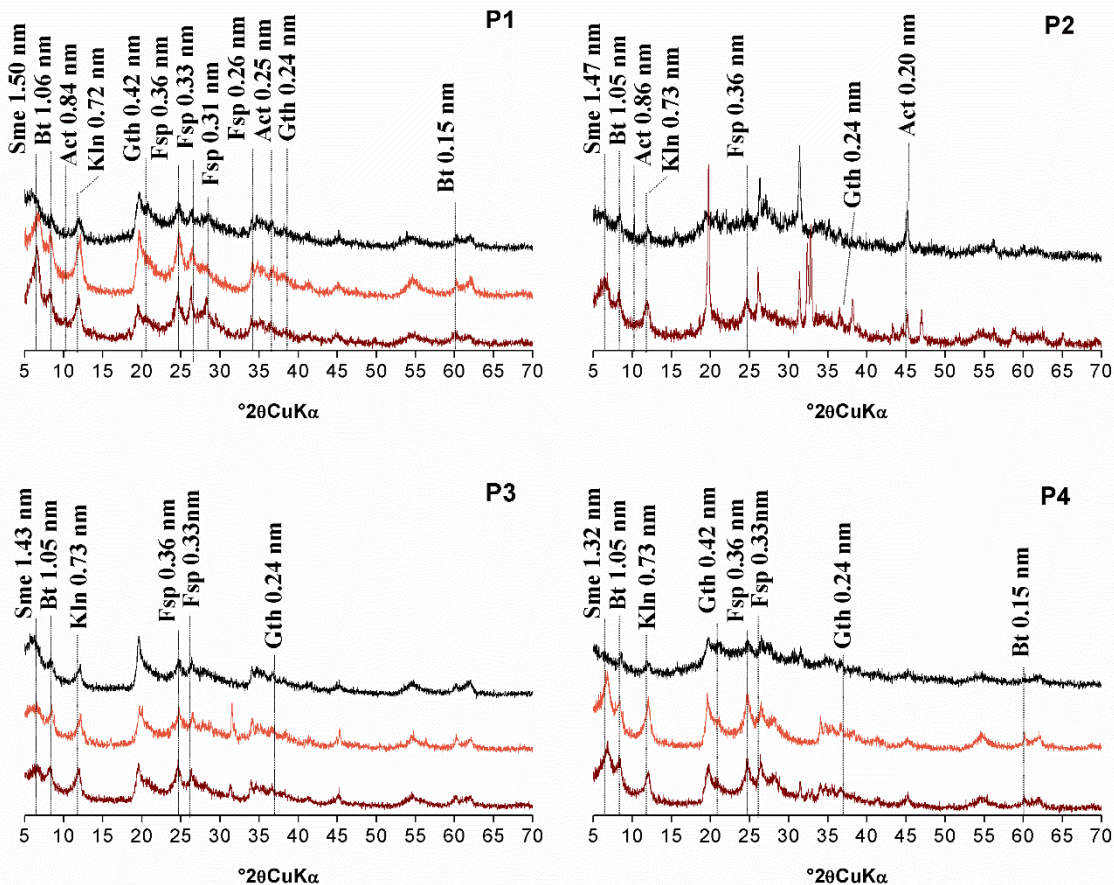
A argila do material de origem (T0), analisada na forma de pó não orientado (Figura 9), apresentou os seguintes minerais: esmectita com pico em 1,42 nm, biotita com pico em 1,05 nm e 0,15 nm, caulinita com pico em 0,73 nm, feldspato com pico em 0,36 nm, 0,33 nm e 0,31 nm e 0,26 nm e biotita com pico em 0,15 nm. Não foi observado a presença de goethita no material de origem.

**Figura 9.** DRX da fração argila analisados na forma de pó não orientado no material de origem formador dos tecnossolos



Sme: esmectita; Bt: biotita; Kln: caulinita; Fsp: feldspatos

**Figura 10.** DRX da fração argila analisados na forma de pó não orientado nos perfis de tecnossolos com dois anos (P1), cinco anos (P2), 10 anos (P3) e 40 anos (P4).



Sme: esmectita; Bt: biotita; Act: actinolita; Kln: caulinita; Gth: goethita; Fsp: feldspatos. P1- linha preta: horizonte superficial Auk; linha laranja: horizonte intermediário 5Cuk<sub>4</sub>; linha vinho: horizonte de maior profundidade 9Cuk<sub>8</sub>; P2- linha preta: horizonte superficial Auk<sub>1</sub>; linha vinho: horizonte de maior profundidade 6Cuk<sub>5</sub>; P3 - linha preta: horizonte superficial Auk; linha laranja: horizonte intermediário 4Cuk<sub>3</sub>; linha vinho: horizonte de maior profundidade 7Cuk<sub>6</sub>; P4 - linha preta: horizonte superficial Auk; linha laranja: horizonte intermediário 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub>; linha vinho: horizonte de maior profundidade 3Cuk<sub>z</sub>;

Os resultados dos difratogramas da fração argila na forma de microagregados orientados e seus respectivos tratamentos estão apresentados nas Figuras 11 e 12. Em P1, foi observado a presença de esmectita, biotita e caulinita nos três horizontes analisados (Figura 11). Vale destacar que há indícios de fases interestratificadas também para os três horizontes, sendo observadas pela presença do pico em 0,846 nm em Auk, 0,852 nm em 5Cuk<sub>4</sub> e 0,846 nm em 9Cuk<sub>8</sub>. Os picos de maiores intensidades para esses minerais foram observados no horizonte intermediário (5Cuk<sub>4</sub>). As lâminas saturadas com magnésio demonstraram comportamento expansivo após a solvatação com etilenoglicol. Esta expansão é característica de minerais do grupo da esmectita, os quais também apresentaram colapso após o aquecimento a 550°C (DIXON, 1985; MOORE; REYNOLDS, 1997).

A caulinita também foi identificada nos três horizontes do P1, com pico de difração em 0,718 nm e 0,357 nm em Auk, 0,723 nm e 0,356 nm em 5Cuk<sub>z4</sub> e 0,721 nm e 0,356 nm em 9Cuk<sub>8</sub>, que colapsaram após aquecimento da lâmina de K 550° C. Os resultados obtidos em P2 mostraram que além da presença de esmectita, biotita, mineral interestratificado e caulinita nos três horizontes, especificamente no horizonte Auk<sub>1</sub> foi observada a presença de clorita a qual, diferentemente da caulina, não colapsou após ser submetida ao aquecimento de K 550° (Figura 11). Nas lâminas com tratamento de MgGlic foi observado o comportamento expansivo da esmectita após a solvatação com etilenoglicol nos dois horizontes Auk<sub>1</sub> e Cuk<sub>5</sub> (Figura 11).

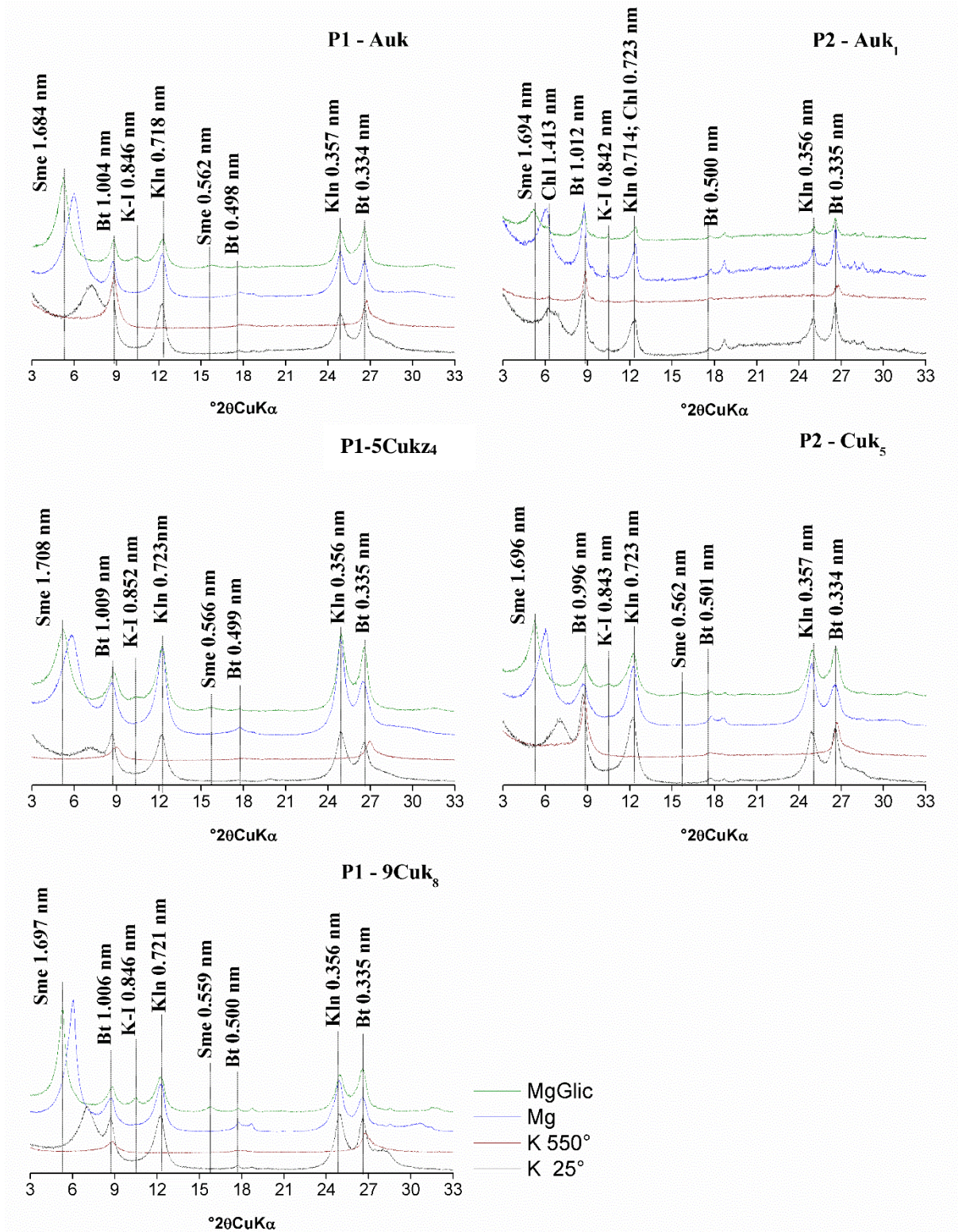
Os perfis P3 e P4 (Figura 12) são semelhantes em relação à composição mineralógica observada nos difratogramas P1 e P2. Em geral, observa-se que P3 e P4 apresentam picos com maiores intensidades para os horizontes superficiais (Auk), sendo observada em P3 a presença da esmectita com pico em 1,708 nm e 0,561 nm, biotita com pico em 1,004 nm, 0,498 nm e 0,335 nm, mineral apresentando interestratificação com pico em 0,843 nm e caulinita com pico 0,720 nm e 0,335 nm.

Em P4 presença da esmectita a com pico em 1,772 nm, biotita com pico em 1,009 nm, 0,501 nm, 0,335 nm, mineral apresentando interestratificação com pico em 0,865 nm e caulinita com pico 0,723 nm e 0,357 nm. Nos horizontes 4Cuk<sub>3</sub> em P3 e 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> em P4 também foram observadas a presença desses minerais nos difratogramas (Figura 12).

Na figura correspondente a amostra representativa do material de origem dos perfis de tecnossolos (T0) (Figura 13) podemos observar a presença dos seguintes minerais: esmectita apresentando picos em 1,684 nm e 0,563 nm, biotita com picos em 1,004 nm, 0,501 nm e 0,334 nm, caulinita com picos em 0,723 nm e 0,357 nm e, assim como nos perfis, há minerais com indícios de fases interestratificadas com pico em 0,849 nm.

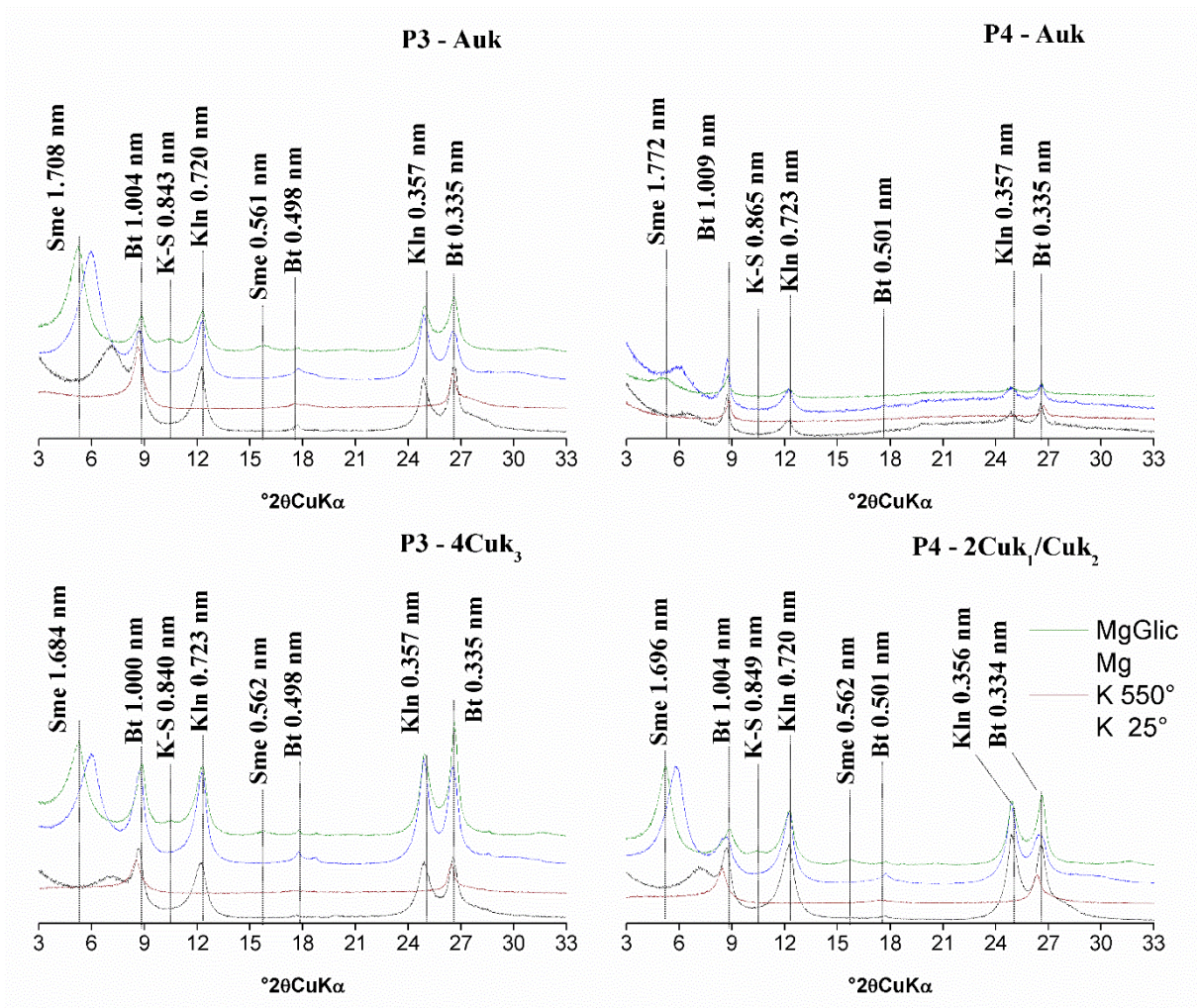


**Figura 11.** - DRX da fração argila analisados na forma de microagregados orientados sobre lâminas de vidro Perfis 1 e 2 de tecnossolos. Sendo A= Auk (cm); 5Cuk<sub>4</sub> (cm); 9Cuk<sub>8</sub> (cm).



Sme: Esmeclita; Bt: Biotita; K-I - Interestratificado; Kln: Caulinita;

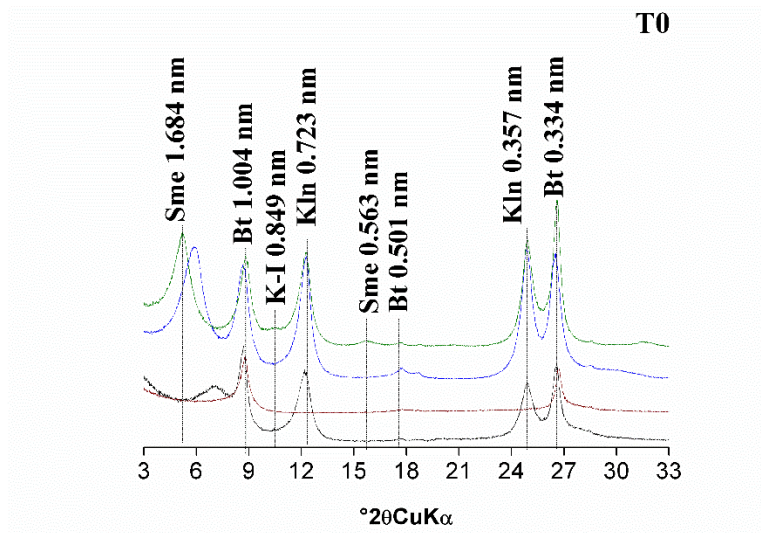
**Figura 12.** DRX da fração argila analisados na forma de microagregados orientados sobre lâminas de vidro Perfis 2 e 3 de tecnossolos.



Sme: Esmeclita; Bt: Biotita; K-I - Interstratificado; Kln: Caulinita;

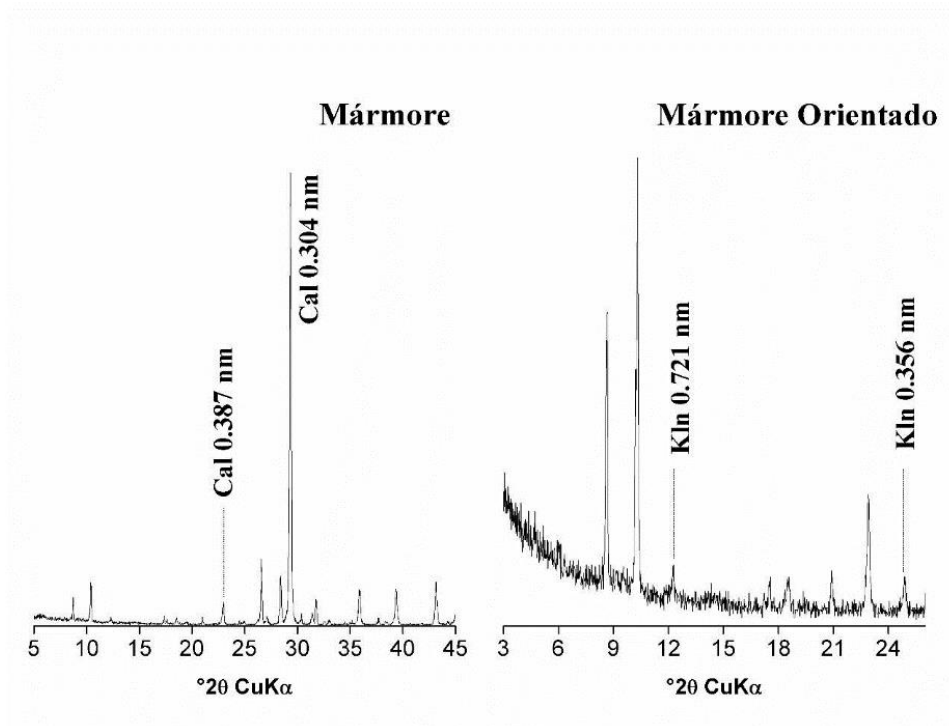


**Figura 13.** DRX da fração argila analisados na forma de microagregados orientados sobre lâminas de vidro no material de origem formador de tecnossolos



Sme: Esmectita; Bt: Biotita; K-I - Interstratificado; Kln: Caulinita;

**Figura 14.** DRX do mármore, material de origem formador do rejeito tecnossolos, analisados na forma de pó e orientado sobre lâminas de vidro



Cal: calcita; Kln: Caulinita.

#### 4.5 Atributos micromorfológicos

Os atributos micromorfológicos mostraram diferenças relevantes entre os tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência de 40 anos



no semiárido brasileiro (Tabela 6). Em geral, observa-se que o material grosso representou mais que 50% da área das seções, seguido do material fino (Tabela 6). A assembleia mineralógica constituinte do material grosso a exemplo do quartzo, feldspatos, carbonatos, minerais opacos, epidoto e biotita foram similares ao longo da cronossequência (Tabela 6), corroborando com os resultados obtidos na análise petrográfica das rochas formadoras do rejeito usado para construir os tecnossolos (Tabela 5). Foram encontrados como componentes do material grosso fragmentos de raízes (Tabela 6) e nódulos de calcita (figura 18N). Cores cinzentas observadas no material fino de alguns perfis (Tabela 6), refletem a proporção de calcita e sua dissolução no solo.

Nos horizontes Auk/2Cuk<sub>1</sub>, 4Cuk<sub>3</sub>/5Cuk<sub>4</sub>, 9Cuk<sub>8</sub> e 10Cuk<sub>9</sub> do P1 houve formação de microestrutura laminar e variação na relação granulométrica, seguindo a sequência contínua de camadas cuja proporção de seus constituintes variou principalmente em relação ao tamanho da fração grossa e em relação à proporção entre os materiais grossos e finos, resultando em maior proporção de material grosso na parte inferior, seguida de intermediário e fino (Tabela 6; Figuras 15A-D). Isso se repetiu ao longo da lâmina em todos os horizontes observados do perfil. Nas seções mais superficiais (Auk/2Cuk<sub>1</sub> e 4Cuk<sub>3</sub>/5Cuk<sub>4</sub>), os constituintes estavam dispostos na diagonal, em camadas paralelas distintas, diferindo na coloração do material fino (Z1), que na superfície apresentou coloração amarelo brunado (Figura 15A), e acinzentado no horizonte mais profundo (Figura 15D), sugerindo variação na proporção de calcitas em relação à presença de argilominerais. Nas seções 9Cuk<sub>8</sub> e 10Cuk<sub>9</sub> foram observadas camadas paralelas na horizontal (Figuras 15C e D). As principais pedofeições observadas no P1 foram: nódulos de calcita em Auk/2Cuk<sub>1</sub> (Figura 15E); preenchimento de carbonatos em 4Cuk<sub>3</sub>/5Cuk<sub>4</sub> (Figura 15F); hiporevestimento de calcita e de ferro em 9Cuk<sub>8</sub> (Figuras 15G e H) e nódulos de calcita (Figura 15J). As quantidades das pedofeições no P1 foram descritas como raras (Tabela 6).

As seções analisadas em P2 foram as representativas dos horizontes Auk<sub>1</sub>/Auk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>, 4Cuk<sub>3</sub> e 7Cuk<sub>6</sub> (Figuras 16). As camadas variaram de paralelas e horizontais em superfície (Figura 16A) a disposição paralelas e inclinadas no horizonte intermediário (Figura 16B). Assim como observado no P1, as microestruturas são laminares ao longo do P2, com predomínio de material grosso (Figura 16A e C), exceto no 4Cuk<sub>3</sub> (Figura 16B). Não foram observadas pedofeições em superfície (Tabela 6). As pedofeições observadas no horizonte 4Cuk<sub>3</sub> foram: preenchimento e revestimento de material orgânico, preenchimento solto e contínuo com material grosso (Figura 16 F), hiporevestimento de ferro em grãos (Figura 16G), excrementos (Figura 16H) e nódulos de calcita (Figura 16I). As quantidades das pedofeições

nesse horizonte foram descritas como raras, exceto para o preenchimento orgânico que foi quantificado como ocasional. Já no horizonte 7Cuk<sub>6</sub> foram observados hiporevestimento de ferro em grão e em poros (Figura 16J e K), hiporevestimento de calcita (Figura 16L) e excrementos (Figura 16M), todas do tipo raras. A coloração no material fino, em geral, foi mais escura (brunada) e ao longo do perfil foi assumindo tons acinzentados (Tabela 6), característica semelhante ao P1.

As seções analisadas em P3 foram Auk/2Cuk<sub>1</sub>, 3Cuk<sub>2</sub>, 4Cuk<sub>3</sub> e 8Cuk<sub>7</sub>. As camadas apresentaram variações ao longo do perfil, sendo observadas em superfície camadas paralelas inclinadas (Auk/2Cuk) (Figura 17A) e, em profundidade, compostas camadas paralelas dispostas na horizontal (Figura 17D). Semelhante ao P1 e P2, o material grosso, em geral, foi preponderante na seção (Tabela 6). Foram observadas as seguintes pedofeições: nódulo de calcita nos horizontes Auk/2Cuk<sub>1</sub> (Figura 17E), revestimento de argila pura amarela em grãos no horizonte 4Cuk<sub>3</sub> (Figura 17F), preenchimento de matéria orgânica do tipo denso incompleto (raro) e capeamento de ligação e revestimentos de grãos no horizonte 8Cuk<sub>7</sub> (frequentes) (Figura 17G e H). Não foram observadas pedofeições no 3Cuk<sub>2</sub>. A microestrutura ao longo do P3 também foi laminar (Figura 17), exceto em 4Cuk<sub>3</sub>, que apresentou além de laminar, estrutura em blocos (Figura 16C). A cor predominante descrita no material fino (Z1) foi bruno amarelado (Tabela 6).

As lâminas analisadas em P4 correspondem aos horizontes Auk/Cuk<sub>1</sub>, Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> e 3Cuk<sub>z</sub>. Observa-se em P4 alterações mais intensas e expressivas (Figura 18) em relação aos demais perfis de tecnossolos. Os constituintes das lâminas apresentaram desorganização e estão dispostos de forma aleatória (Figura 18A-C). Nos horizontes Auk/Cuk<sub>1</sub>, o material grosso foi preponderante ao longo da seção (Tabela 6) e a granulometria foi maior em comparação com os perfis de tecnossolos mais jovens (P1, P2 e P3). O P4 apresentou microestruturas complexas no horizonte superficial, formada por grãos simples e grãos com película além de muita baixa frequência de granular disperso (Tabela 6). Nas pedofeições do P4, foram observados preenchimento de argila límpida amarela do tipo denso completo (raros) (Figura 18D), preenchimento solto e contínuo de grãos grossos (Figura 18E), excremento (Figura 18F) e outras estruturas biológicas (Figuras 18G).

Nos horizontes Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/2Cuk<sub>2</sub> do P4, foram observados fragmentos descontínuos de seções compostas por material fino preponderante. As microestruturas foram laminares e em blocos (Tabela 6). Para fins de descrição, as pedofeições foram separadas em zonas, em que Z1 apresentou excrementos (Figura 18J), hiporevestimento de Mn/Fe (raros) (Figura 18K) e preenchimentos denso incompleto de matéria orgânica (raros) (Figura 18L). Já na camada de

material grosso (Z2), foram observados preenchimentos de argila límpida amarela do tipo denso completo (abundantes) (Figura 18M), revestimentos de argila límpida amarela em grãos (ocasional) e nódulos de calcita (raros) (Figura 18N).

No horizonte mais profundo do P4 (3Cukz), o material grosso foi predominante e foram descritas estrutura em grão simples e grãos com película (Figura 18C). Em relação às pedofeições do 3Cukz, foram observados excrementos (raros) (Figura 18O) e revestimento típico de argila em grãos (comuns) (Figura 18P). Vale destacar que ao longo de todo o perfil foram observados preenchimento de argila descrito nas pedofeições e a cor do material fino em todos os horizontes do P4 foi amarelo-brunado (Figura 18; Tabela 6).



**Tabela 6.** Atributos micromorfológicos de tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência de 40 anos no semiárido brasileiro

Perfil 1 - Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (2 anos)				
Atributo	Auk/2Cukz <sub>1</sub>	4Cukz <sub>3</sub> /5Cukz <sub>4</sub>	9Cuk <sub>8</sub>	10Cuk <sub>9</sub>
Geral	Seções paralelas na diagonal. Com sequência de material grosso/intermediário (Z2) e fino (Z1). Z1: 30%. Z2: 70%.	Seções paralelas (descontínuas em toda lâmina) na diagonal. Com sequência de material grosso/intermediário (Z2) e fino (Z1). Z1: 80%; Z2: 20%.	Seções paralelas na horizontal. Seguindo a sequência de material grosso/intermediário (Z2) (preponderante) e fino (Z1), com bordas onduladas. Z1: 70%; Z2: 30%.	Seções paralelas na horizontal. Com sequência de material grosso/intermediário (Z2) (preponderante) e fino (Z1), com bordas na porção superior da lâmina. Z1: 30%; Z2: 70%.
Material grosso (%)	Z1:10 Z2:70-90	Z1:10 Z2:25-50	Z1:5-25 Z2:40-70	Z1:5 Z2:70-90
Material fino (%)	Z1:85 Z2:5-20	Z1:85 Z2:40-60	Z1:90-70 Z2:25-50	Z1:90 Z2:5-15
Poros	Z1:5 Z2:5-10	Z1:5 Z2:10-15	Z1:5 Z2:5-10	Z1:5 Z2:5-15
Coloração material fino	Z1:Amarelo brunado (LT/LI); Z2:Cinzeno (LT/LI). Salpicado	Z1:cinzeno (LT/LI); Z2:cinzeno (LT/LI) e Amarelo brunado (LT/LI). Salpicado.	Z1:cinzeno/bruno claro (LT/LI); Z2:cinzeno (LT/LI). Salpicado	Z1:cinzeno/bruno claro
Material grosso	Calcita, biotita/muscovita/flogopita, quartzo, opacos, epidoto, raízes, nod. calcita e minerais não identificados.	Calcita, biotita/muscovita/flogopita, quartzo, opacos, epidoto, raízes e minerais não identificados.	Calcita, biotita/muscovita/flogopita, quartzo, opacos e minerais não identificados.	Feldspatos, Calcita, biotita/muscovita/
Fábricas-b	Cristalítica e salpicada granida (Z1 na zonas amarelo brunada)	Cristalítica	Cristalítica	cristalítica

Distribuição relativa	Z1:Porfírica aberta; Z2:Porfírica fechada.	Z1:Porfírica aberta; Z2:Porfírica com espaçamento simples.	Z1:Porfírica aberta; Z2:Porfírica fechada com frequente ocorrência de áreas quitomônica-gefúrica	Z1:Porfírica aberta; Z2:Mônica grossa; Porfírica com espaçamento simples
Microestrutura	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar
Porosidade	Canais, cavidades irregulares e planares retilíneos	Canais, cavidades irregulares e planares retilíneos.	Vesículas (Z1); Canais, cavidades irregulares e planares curvadas	Vesículas e planares curvados.
Pedofeição	Z2: Nódulo de Calcita típico órtico (raros).	Preenchimento de carbonatos do tipo denso incompleto e discretos (raros).	Hiporevestimentos de calcita (ocasional); Hiporevestimento de Fe (raros)-mosqueado.	Hiporevestimentos de calcita em grão (ocasional); Nódulo de Calcita típico órtico (raros).

**Perfil 2 - Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (5 anos)**

Atributo	Auk <sub>1</sub> /Auk <sub>2</sub> /2Cuk <sub>1</sub>	4Cuk <sub>3</sub>	7Cuk <sub>6</sub>
Geral	Seções paralelas na horizontal. Com a sequência de material grosso (preponderante) e fino. Z1: 5% d; Z2: 95%.	Tendência de disposição em bandas paralelas/inclinadas na horizontal, mas não claramente seccionados por granulometria. Apresenta material fino+intermediário (predominante) com limitadas zonas de material grosso. Z1: 90% Z2: 10%	Seções paralelas inclinadas. A fração grossa/intermediária é dominante. O material fino é apresentado em poucas camadas de pequena espessura, concentrados na porção média superior da lâmina. Z1: 30% Z2: 70%.
Material grosso (%)	Z1:5 Z2:85	Z1:5 Z2:80	Z1:15 Z2:70
Material fino (%)	Z1:90 Z2:5	Z1:90 Z2:10	Z1:75 Z2: 5
Poros	Z1:5 Z2:10	Z1:5 Z2:10	Z1:10 Z2:25

Coloração material fino	Z1: Bruno-oliváceo claro (LT) e oliva claro-acinzentado(LI), salpicado (pontuações vermelhas).	Bruno amarelada (LT), amarelo (LI), salpicado (pontuações vermelhas)	Z1:Cinzento (LT/LI), Bruno amarelada (LT) e Amarelo (LI) Z2:Cinzento (LT/LI). Salpicado (por pontuações vermelhas).
Material grosso	Calcita, biotita/muscovita/flogopita, quartzo, opacos, raízes, feldspatos e minerais não identificados	Calcita, muscovita/biotita/flogopita, quartzo, opacos e minerais não identificados e raízes.	Calcita, biotita/muscovita/flogopita, quartzo, opacos, raízes e minerais não identificados.
Fábricas-b	Z1: salpicada granida; Z2: indiferenciada.	Z1: salpicada granida e mosaico; Z2:cristalítica.	Z1: salpicada granida; Z2: indiferenciada e cristalítica
Distribuição relativa	Z1: Porfírica fechada; Z2: Mônica.	Porfírica com espaçamento simples	Z1:pórfirica fechada; Z2:mônica.
Microestrutura	Laminar	Laminar	Laminar
Porosidade	Canais, cavidades irregulares e planares retilíneos.	Vesículas; Canais, cavidades irregulares e planares retilíneas e curvadas	Vesículas, Canais, e planares retilíneos
Pedofeição	Ausentes	Preenchimento de matéria orgânico do tipo denso completo ou incompleto (ocasional); Revestimento dematéria orgânica (raros); Preenchimento solto e contínuo com material grosso (raros); Hiporevestimento de ferro em grãos (raros) - Alteração; Excrementos (raros); Nódulos de calcita (raros).	Hiporevestimento de ferro em poro (raros); Hiporevestimento de ferro em grãos (raros)-alteração; Hiporevestimento de calcita (raros); Excrementos (raros).

**Perfil 3 - Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) (10 anos)**

Atributo	Auk/2Cuk <sub>1</sub>	3Cuk <sub>2</sub>	4Cuk <sub>3</sub>	8Cuk <sub>7</sub>
Geral	Seções paralelas inclinadas. Seguindo a sequência de material grosso, intermediário e fino. Na porção média da lâmina é observado mistura dos constituintes. Z1: 10%; Z2: 90%.	Seções paralelas suavemente inclinadas. Seguindo a sequência de material grosso (preponderante), intermediário e fino. Z1:20% Z2:80%.	Diferentes seções dispostas na horizontal seguindo a tendência de material grosso (predominante), intermediário e fino. O material fino (alternado com intermediário) concentra-se na porção média superior da lâmina, sendo as seções descontínuas por fraturas. Z1: 20%; Z2: 80%.	Seções paralelas dispostas na horizontal. Com sequência de material grosso, intermediário (grosso/intermediário) e fino, da base até porção média superior da lâmina e, em seguida, o material grosso e intermediário (preponderante) misturados. Z1: 20%; Z2: 80%.
	Material grosso (%)	Z1:10 Z2:70	Z1: 5 Z2: 70	Z1:15 Z2:65
Material fino (%)	Z1:70 Z2:15	Z1: 85 Z2: 5	Z1:70 Z2:5	Z1:85 Z2:2-20
Poros	Z1:20 Z2:15	Z1: 10 Z2: 25	Z1:15 Z2:30	Z1:5 Z2:8-10
Coloração material fino	Z1:bruno amarelado (LT/LI); Z2:cinzento (LT/LI). Salpicado.	Cinzento (Z2) (LT/LI), bruno amarelado e acinzentado (Z1) (LT) e bruno amarelado (LI), salpicado	Z1:Bruno amarelado (LT/LI); Z2:Cinzento (LT/LI). Salpicado.	Z1:bruno amarelado (LT/LI); Z2:cinzento (LT/LI). Salpicado



Material grosso	Calcita, biotita/muscovita, quartzo, opacos, raízes, nód. Calcita, mineral não identificado.	Calcita, biotita/muscovita, quartzo, opacos, epidoto, raízes e minerais não identificados.	Calcita, biotita/ muscovita/flogopita, quartzo, opacos e minerais não identificados.	Calcita, biotita/muscovita, quartzo, opacos e minerais não identificados.
Fábricas-b	Z1: salpicada granida e mosaico; Z2: cristalítica	Z1: salpicada granida e mosaico (bruno amarelo) e Cristalítica (cinzento); Z2: indiferenciada.	Z1: salpicada granida (bruno amarelo) e cristalítica (cinza); Z2: indiferenciada	Salpicada granida
Distribuição relativa	Z1:Pórfirica aberta; Z2:Mônica coalescida	Z1:Pórfirica Z2:Mônica.	Z1:porfírica fechada; Z2: monica-quitônica.	Z1: Porfírica aberta; Z2: mônica (grãos grossos e abertos) e mônica-gefurica-quitônica (na parte de grãos médios e adensados)
Microestrutura	Laminar	Laminar	Laminar e Blocos	Laminar
Porosidade	Z1: Vesículas, cavidade e fissuras; Z2:empilhamento simples,	Z1: fissuras e vesículas; Z2: empacotamento simples, Cavidades irregulares	Z1: fissuras e canais e cavidades; Z2:empacotamento simples, canais.	Planares em retilíneos.
Pedofeição	Nódulo de calcita típico órtico (raros).	Ausente	Revestimento de argila pura amarela em grãos (raros).	Preenchimento de matéria orgânica do tipo denso incompleto (raro); Capeamento de ligação e revestimentos de grãos (frequentes).

**Perfil 4- Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic) (40 anos)**

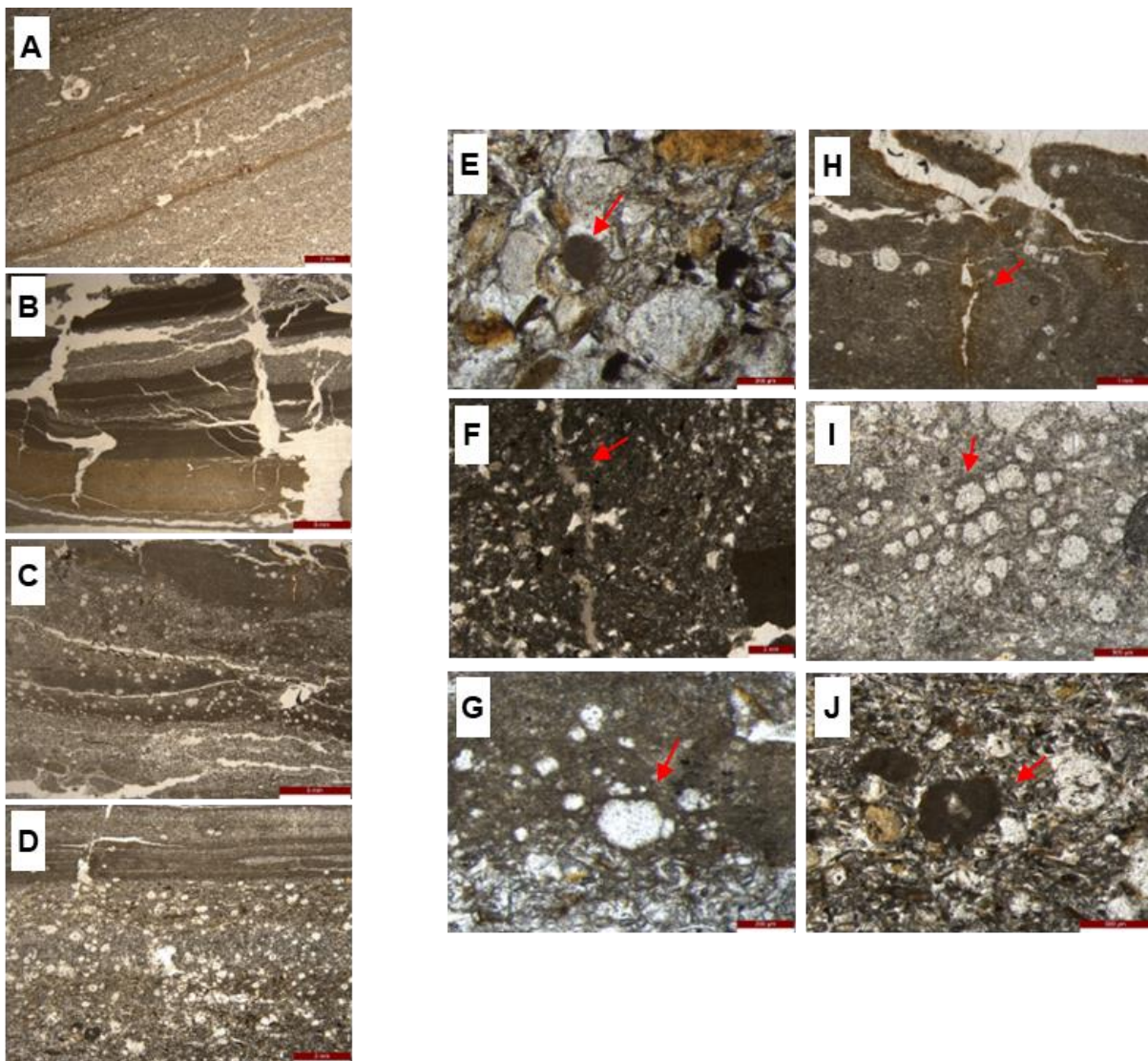
Atributo	Auk/Cuk <sub>1</sub>	Cuk <sub>2</sub> /2Cuk <sub>1</sub> /Cuk <sub>2</sub>	3Cuk <sub>z</sub>
Geral	Tendência de desorganização dos constituintes da lâmina. As seções de material fino, observadas nos perfis anteriores, encontram-se em pequenos e poucos fragmentos dispostos de forma aleatória. O material grosso é preponderante ao longo da lâmina, granulometria maior que o observado nos perfis anteriores.	Tendência de desorganização dos constituintes da lâmina, apresentando fragmentos descontínuos de seções compostas por material fino (preponderante) e grosso+intermediário. Apresenta tendência de inclinação do material. Z1: 80%; Z2: 20%.	Constituintes dispostos aleatoriamente, com ocorrência material grosso predominante e de material intermediário em muito baixa frequência.
Material grosso (%)	80	Z1: 10 Z2: 70	85
Material fino (%)	5	Z1: 85 Z2: 15	5
Poros	15	Z1: 5 Z2: 15	10
Coloração material fino	Amarelo brunado (LT/LI). Salpicado	Z1: Amarelo brunado (LT/LI), Salpicado (com pontuações vermelho escuro).	Amarelo brunado (LT/LI), límpida.
Material grosso	Calcita, biotita/muscovita, quartzo, opacos, raízes, minerais não identificados, nód. calcita.	Calcita, biotita/ muscovita/flogopita quartzo, opacos, raízes.	Calcita, biotita/ muscovita/flogopita, quartzo, opacos minerais não identificados
Fábricas-b	Salpicada granida.	uniestriada (Z1); Salpicada mosaica e granida.	Indiferenciada
Distribuição relativa	Quitô-mônica.	Z1: Porfírica aberta; Z2: quitonica-gefurica-porfirica	Quito-mônica

Microestrutura	Complexa formada por grãos simples e grãos com películas, com muito baixa frequência de granular dispersos de forma aleatória na matriz.	Laminar e blocos.	Grão simples e grãos com películas.
Porosidade	Canais, câmara e cavidades equidimensionais	Canais, cavidades irregulares e planares retilíneas.	Intergranulares, canais e cavidades irregulares.
Pedofeição	Preenchimento de argila límpida amarela do tipo denso completo (raros); Preenchimento solto contínuo de grãos grossos; Excremento; Outras estruturas biológicas.	Região Z1: Nódulos agregados e típicos (raros); Excrementos; Hiporevestimento de Mn/Fe (raros); Preenchimentos denso incompleto de matéria orgânica (raros). Região Z2: Preenchimento de argila límpida amarela do tipo denso completo (abundantes); Revestimentos de argila límpida amarela em grãos (ocasional); Nod de Calcita (raros).	Excrementos (raros); Revestimento típico de argila em grãos (comuns).

---

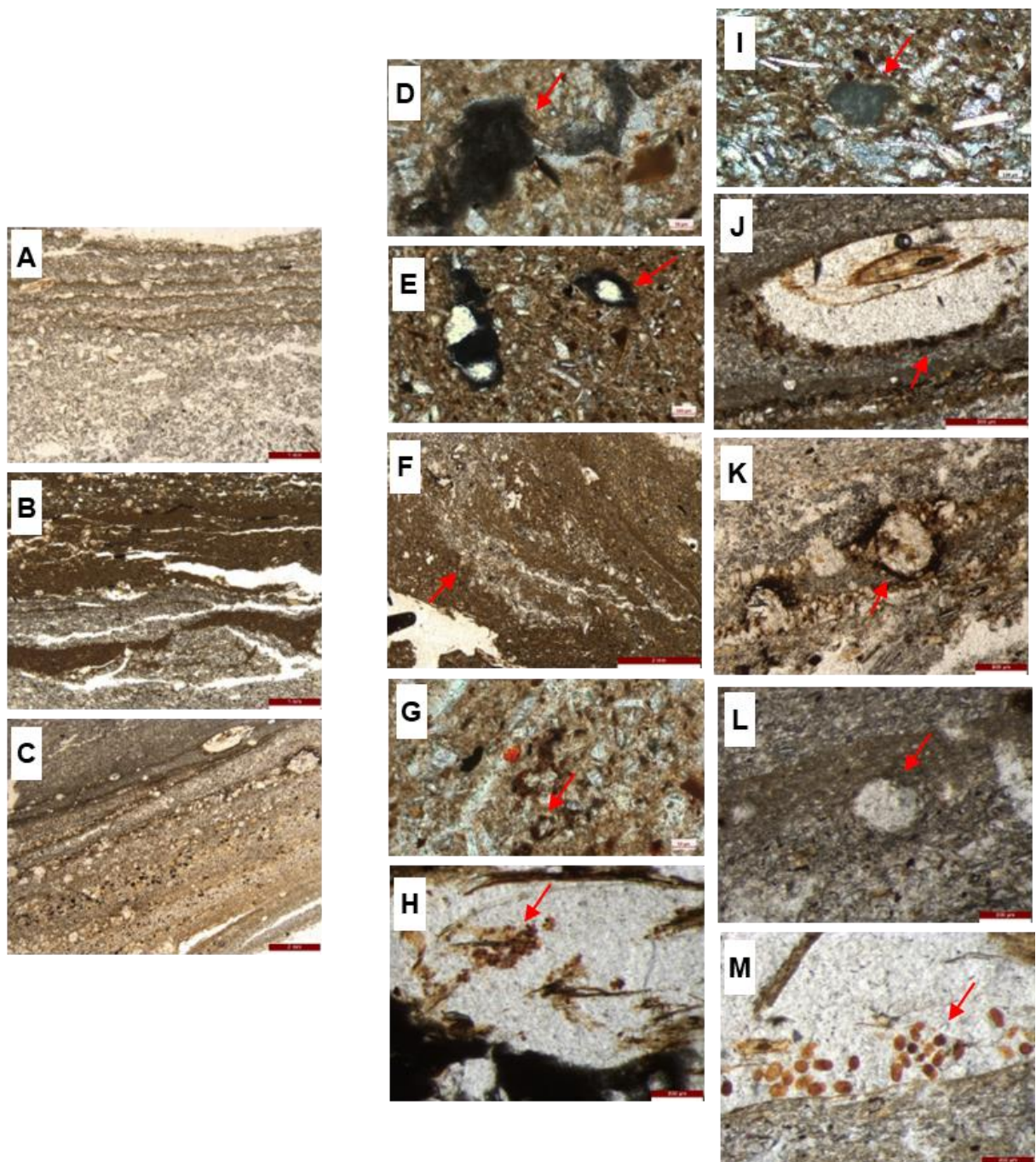
MG: Material grosso; MF: Material fino; P: Poros; Z1: Camada de material fino; Z2: Camada de material grosso/intermediário; Relação G/F: 0,0

**Figura 15.** Fotomicrografias sob luz polarizada do P1 - dos componentes gerais: A: Auk/2Cukz<sub>1</sub> (8x); B: 4Cukz<sub>3</sub>/5Cukz<sub>4</sub> (8x); C: 9Cuk<sub>8</sub> (10x); D: 10Cuk<sub>9</sub> (10x); e das pedofeições: E: nódulo de calcita típico órtico no Auk/2Cukz<sub>1</sub> (100x); F: preenchimento de carbonatos no 4Cukz<sub>3</sub>/5Cukz<sub>4</sub> (16x); G: hiporevestimento de calcita no 9Cuk<sub>8</sub> (100x); H: hiporevestimento de Fe no 9Cuk<sub>8</sub> (40x); I: hiporevestimento de calcita no 10Cuk<sub>9</sub> (40x); J: nódulo de calcita típico órtico no 10Cuk<sub>9</sub> (50x).

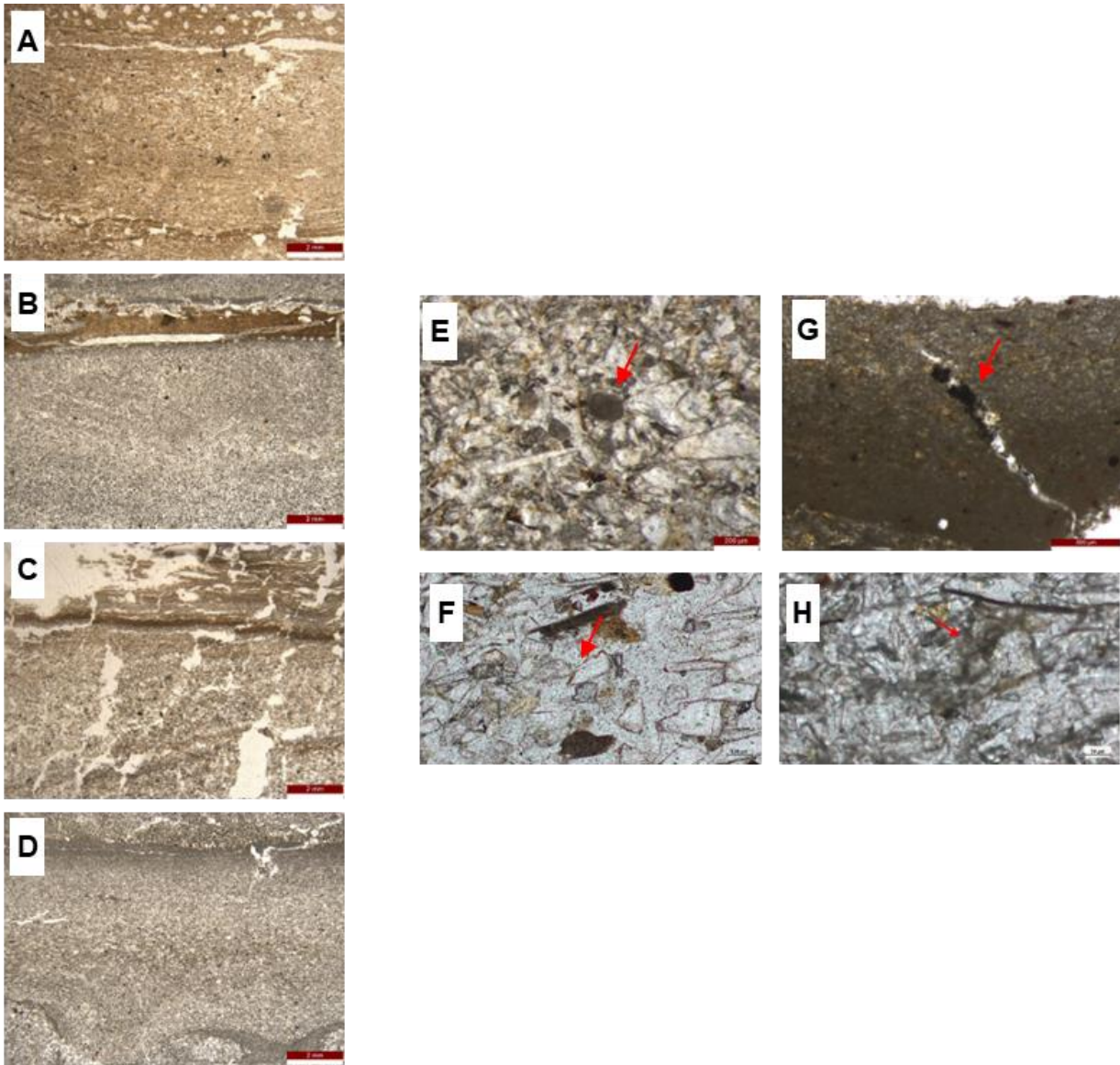




**Figura 16.** Fotomicrografias sob luz polarizada do P2 - dos componentes gerais: A:  $Auk_1/Auk_2/2Cuk_1$  (20x); B:  $4Cukz_3$  (20x); C:  $7Cuk_6$  (10x); e das pedofeições: D: preenchimento de matéria orgânica no  $4Cukz_3$  (200x); E: revestimento de matéria orgânica no  $4Cukz_3$  (100x); F: preenchimento solto de material grosso no  $4Cukz_3$  (16x); G: hiporevestimento de ferro no  $4Cukz_3$  (200x); H: excrementos no  $4Cukz_3$  (100x); I: nódulo de calcita no  $4Cukz_3$  (100x); J: hiporevestimento de Fe no  $7Cuk_6$  (63x); K: hiporevestimento de Fe no  $7Cuk_6$  (40x); L: hiporevestimento de calcita no  $7Cuk_6$  (100x); M: excrementos no  $7Cuk_6$  (100x).

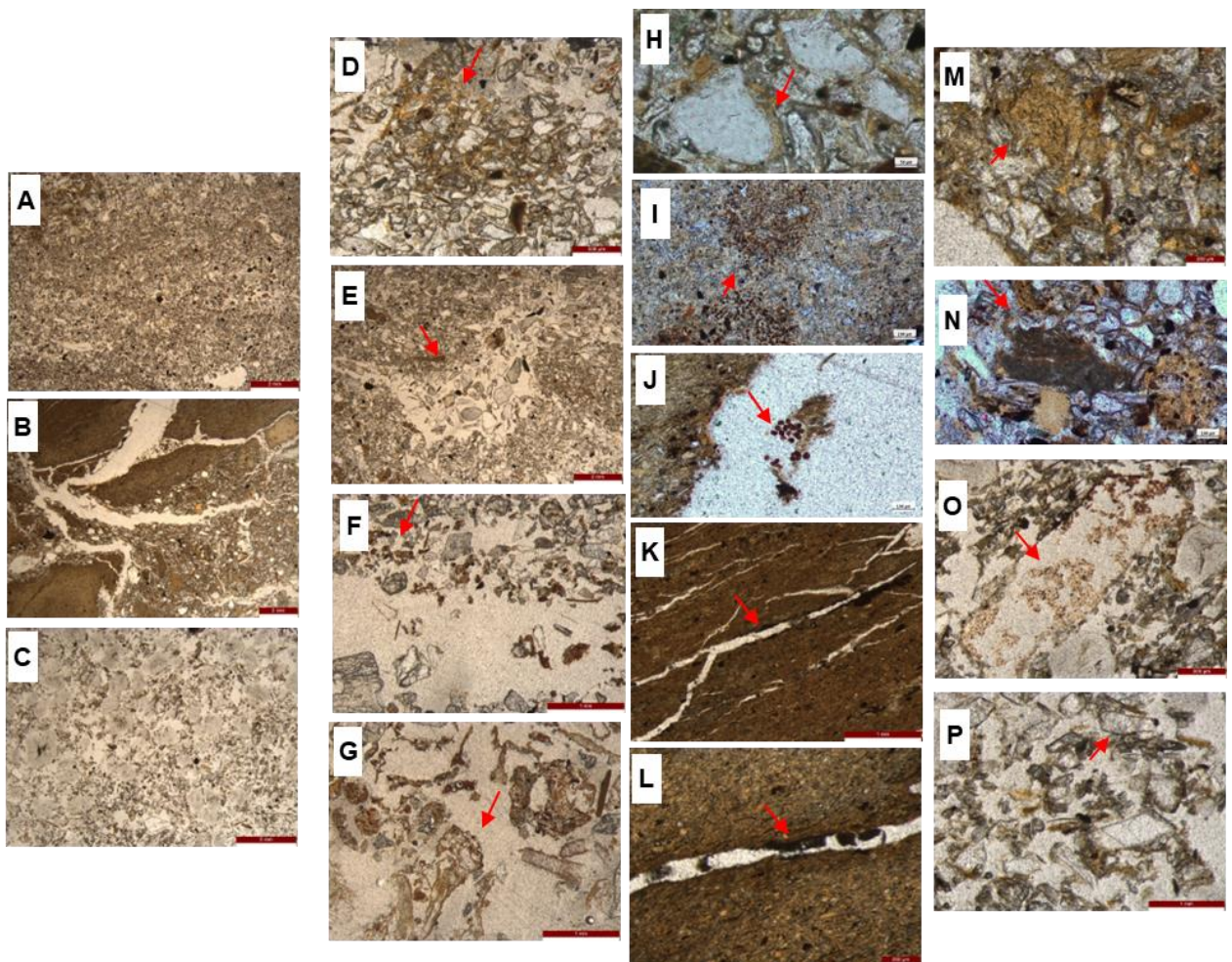


**Figura 17.** Fotomicrografias sob luz polarizada do P3 - dos componentes gerais: A: Auk/2Cuk<sub>1</sub> (10x); B: 3Cuk<sub>2</sub> (10x); C: 4Cuk<sub>3</sub> (10x); D: 8Cuk<sub>7</sub> (10x); e das pedofeições: E: nódulo de calcita típico órtico no Auk/2Cuk<sub>1</sub> (80x); F: revestimento de argila pura amarela no 4Cuk<sub>3</sub> (100x); G: preenchimento de matéria orgânica no 8Cuk<sub>7</sub> (50x); H: capeamento de ligação e revestimento de grãos no 8Cuk<sub>7</sub> (200x).

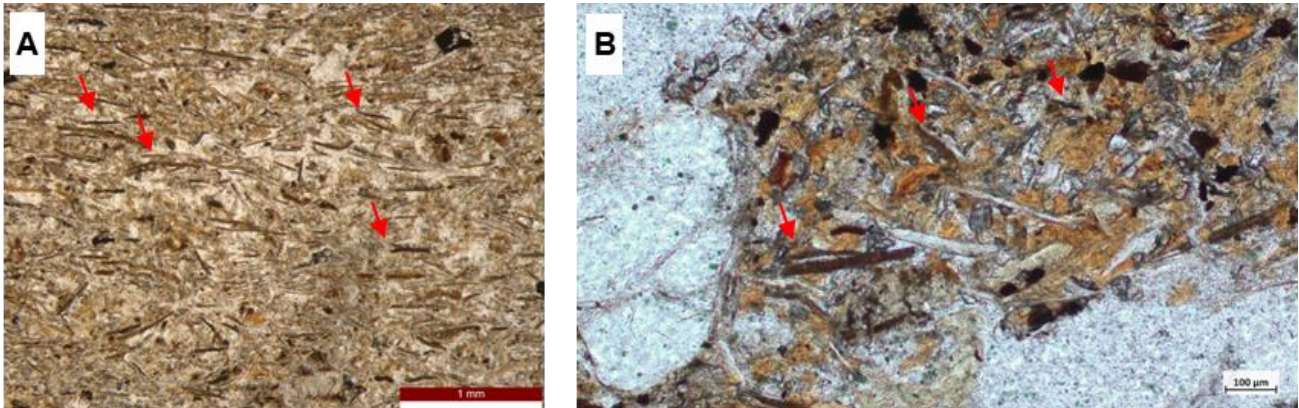




**Figura 18.** Fotomicrografias sob luz polarizada do P4 - dos componentes gerais: A: Auk/Cuk<sub>1</sub> (10x); B: Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (8x); C: 3Cuk<sub>z</sub> (10x); e das pedofeições: D: preenchimento de argila límpida no Auk/Cuk<sub>1</sub> (40x); E: preenchimento de grãos grossos Auk/Cuk<sub>1</sub> (10x); F: excrementos no Auk/Cuk<sub>1</sub> (32x); G: outras estruturas biológicas no Auk/Cuk<sub>1</sub> (32x); H: revestimento de argila límpida no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (200x); I: nódulos agregados e típicos no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (100x); J: excrementos no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (100x); K: hiporevestimento de Mn/Fe no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (32x); L: preenchimento de matéria orgânica no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (80x); M: preenchimento de argila límpida no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (80x); N: nódulo de calcita no Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (100x); O: excrementos no 3Cuk<sub>z</sub> (40x); P: revestimento típico de argila no 3Cuk<sub>z</sub> (63x).



**Figura 19.** Fotomicrografias sob luz polarizada da distribuição e orientação das biotitas: A: horizonte Auk/2Cuk<sub>1</sub> do P3 (32x); e B: horizonte Cuk<sub>2</sub>/2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> do P4 (100x).



#### 4.6 Classificação dos solos na WRB/FAO 2022

Os perfis representativos de cada área (2, 5, 10 e 40 anos), desenvolvidos a partir de rejeitos de mineração de scheelita, depositados à céu aberto e que não ocorreriam de forma natural na superfície da Terra, foram classificados de acordo com a Base de Referência Mundial como Tecnessolos (IUSS Working Group WRB, 2022). Por definição, essa ordem de solo é classificada como Tecnessolo por conter no mínimo 20% de artefatos incorporados em uma profundidade de até 100 centímetros (ROSSITER, 2006; IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

Os quatro perfis de tecnessolos formados dos rejeitos da atividade de mineração foram classificados como Spolic Technosol, sendo P1, P2 e P3 definidos como Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic) e P4 como Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic), apresentando alteração em apenas um dos subqualificadores complementares.

O qualificador primário indica que os quatro perfis de tecnessolos possuem uma camada  $\geq 20$  cm de espessura e dentro de 100 cm da superfície do solo contendo  $> 35\%$  de rejeitos de mina como artefatos. O primeiro subqualificador Loamic indica que o perfil consiste em material mineral e possui, simples ou em combinação, a classe de textura franca, franco arenoso, franco argiloso, franco argiloso arenoso ou franco argiloso siltoso. O segundo subqualificador Alcalic indica que os teores de pH em água  $\geq 8,5$  nos 50 cm superiores da superfície do solo mineral. Calcic é o terceiro subqualificador que indica a presença de um horizonte cálcico começando  $\leq 100$  cm da superfície do solo mineral (Calcic).



O último subqualificador Humic presente em P1, P2, P3 corresponde a presença de carbono orgânico do solo  $\geq 1\%$  e o Hyperhumic presente no P4 indica a presença de carbono orgânico do solo  $\geq 5\%$ , ambos os percentuais até uma profundidade de 50 cm da superfície do solo mineral.

## 5. DISCUSSÕES

### 5.1 A Pedogênese inicial

Os perfis de tecnossolos construídos com rejeito de mineração de scheelita no semiárido brasileiro apresentaram evolução morfológica ao longo da cronossequência de 40 anos (Tabela 1). O aumento da espessura dos horizontes superficiais (Auk) dos tecnossolos com o avançar da idade, passando de 5 cm no P2 (5 anos) para 10 cm no P4 (40 anos), indica a pedogênese inicial dos perfis, mesmo sob condições semiáridas. O tecnossolo com 40 anos apresentou estágio mais avançado de homogeneização dos seus horizontes, evidenciado pelo menor número de horizontes descritos no perfil (P4, cinco horizontes) em comparação com o tecnossolo mais jovem (P1, dez horizontes) (Tabela 1). Isso também demonstra a ocorrência da pedogênese inicial de tecnossolos derivados da mineração de scheelita em ambiente semiárido, provocada por distintos processos pedogenéticos ao longo do tempo (Tabela 6).

Em relação à estrutura dos tecnossolos, os perfis mais jovens (P1, P2 e P3) apresentaram estruturas laminares, exceto nos horizontes superficiais, onde foram observadas estruturas granulares e em blocos subangulares no P1 (Auk) e apenas estrutura em blocos subangulares no P2 (Auk<sub>1</sub> e Auk<sub>2</sub>) e P3 (Auk). Já o tecnossolo com 40 anos apresentou maior evolução estrutural, com estrutura em blocos subangulares ao longo de todo perfil e presença de blocos angulares no horizonte 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> (espessura de 45 cm). O desenvolvimento de estrutura, mesmo no tecnossolo com apenas 2 anos, é um indicativo de solo com boa qualidade e demonstra que a presença da vegetação é capaz de promover processos pedogenéticos expressivos, a exemplo da pedalização (Tabela 1). O aumento do grau de desenvolvimento das estruturas dos tecnossolos ao longo da cronossequência, variando de grau fraco no P1 (2 anos) a moderado e forte em alguns horizontes do P4 (40 anos) (Tabela 1) é mais um indício da pedogênese inicial desses tecnossolos. Estruturas com grau de desenvolvimento forte raramente foram relatadas na descrição morfológica de tecnossolos derivados de rejeitos de mineração, mesmo quando estudados por longos períodos (RUIZ et al., 2020b; SANTINI; FEY, 2016; SOKOLOV et al. 2015).

O tamanho das estruturas dos tecnossolos, variando de pequena a média, foi reflexo das composições dos materiais que originaram o rejeito usado para construir os tecnossolos (T0,

rejeito) (Tabela 2), os quais são compostos por partículas de granulometria fina, com predomínio da fração areia fina, seguida da fração silte (Tabela 2). O arranjo das estruturas foi resultado das ligações das partículas primárias dos tecnossolos entre si por substância como a matéria orgânica, óxidos de ferro, carbonatos e sílica.

Ao longo dos anos, foi observado aumento de CO nos horizontes Auk dos quatro perfis de tecnossolos (Tabela 3). O acúmulo de CO desencadeou o escurecimento dos horizontes superficiais, por meio da mistura do material mineral com a matéria orgânica. Em escala micromorfológica, também foi observado predomínio de cores mais claras no P1 (perfil menos desenvolvidos) (Figura 15) e predomínio de cores mais bruno amareladas e amarelo-brunadas no material fino dos horizontes superficiais dos perfis P2, P3 e P4 (perfis mais desenvolvidos) (Figuras 16, 17 e 18; Tabela 6). Como resultado, houve aumento da espessura dos horizontes Auk nos perfis (Tabela 1), evidenciando a ocorrência do processo de melanização na pedogênese desses tecnossolos (Tabela 6). Ao longo da cronosequência foi observado aumento gradativo do processo de melanização. A intensificação da melanização pode ocorrer tanto pelo maior tempo de pedogênese, quanto pela adição de matéria orgânica pela vegetação (RUIZ et al., 2020b). O processo de melanização nos tecnossolos estudados é importante por promover a estabilização das partículas, resultando na redução dos processos erosivos, aumento da porosidade e da capacidade de armazenamento de nutrientes e retenção de água. A variação de cor nos tecnossolos ao longo da cronosequência (Tabela 1) foi reflexo da mineralogia dos tecnossolos. Tons mais amarelados nos materiais finos dos tecnossolos (Tabela 6) foram provocadas pela presença de goethita na fração argila (Figura 10). Tons amarelados em luz transmitida (LT) (Tabela 6) também expressam alterações de minerais e maior proporção de argila, com presença de goethita. Nesse contexto, o aumento de tons mais amarelados nos tecnossolos ao longo da cronosequência também evidencia o avançar da pedogênese.

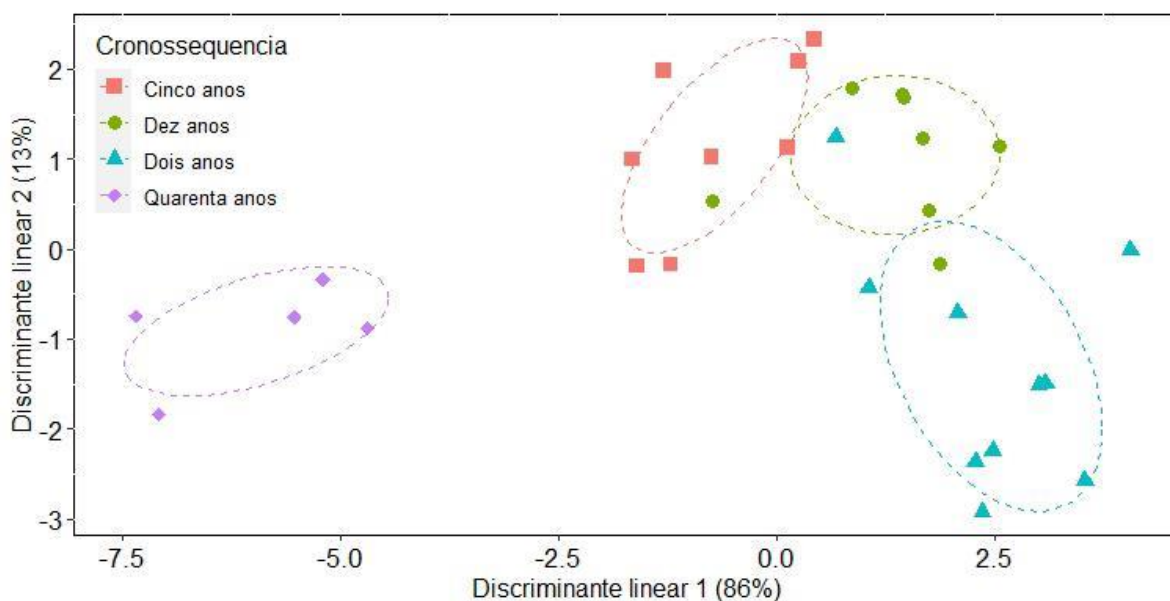
Pedofeições de hiporrevestimentos de ferro foram encontradas em todos os perfis de tecnossolos (Figuras 15, 16 e 18; Tabela 6), assim como revestimento de argila amarelas e preenchimentos densos completos de argila (Tabela 6). Essas pedofeições possivelmente estão associadas a alteração da biotita (Figura 19). Ademais, os revestimentos de argila sugerem que houve incipiente iluviação de argila e acúmulo na superfície dos grãos, indicando translocação de argila nos tecnossolos. Possivelmente, a iluviação devido às chuvas fez com que as partículas de argila se movessem da superfície para a subsuperfície dos tecnossolos. Em escala micromorfológica, foi possível observar outras feições pedogenéticas que indicam a presença de pedogênese nos tecnossolos, a exemplo de excrementos nos perfis P2 e P4 (Figuras 16 e 18). A presença de excrementos indica a ocorrência do processo de bioturbação nos perfis. Várias

funções podem ser inferidas a partir do processo de bioturbação, como melhoria nas propriedades físicas do tecnossolo (WILKINSON et al., 2009), retenção de água, capacidade de aeração (LAVELLE, 1997), mineralização de MO e acúmulo de C no solo (FROUZ et al., 2007). Logo, estudos sobre micromorfologia em tecnossolos têm levado ao reconhecimento do importante papel que a fauna do solo desempenha na pedogênese de tecnossolos (DOMÍNGUEZ-HAYDAR et al., 2018; FROUZ et al., 2006).

Em P1, foram observadas estruturas laminares (Figura 15). Esse tipo de estrutura está relacionado com a forma de deposição do rejeito usado para construir os tecnossolos. Com o passar dos anos, devido a perturbação causada pelos organismos bioturbadores, essas camadas vão sendo misturadas, ficando mais homogêneas e promovendo a formação de agregados (Tabela 1, Figura 17). No P4, perfil mais antigo (40 anos), já não é possível observar distribuição laminar nos horizontes, estando o perfil homogeneizado (Figura 18) e com formação de agregação (Tabelas 1 e 6). Outro indicativo dessa mistura entre os horizontes é a perda de orientação da biotita ao longo da cronossequência (Figura 19). Essas alterações demonstram que a bioturbação é um processo importante na pedogênese de tecnossolos derivados da mineração de scheelita.

O potencial de discriminação dos tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita no semiárido brasileiro ao longo da cronossequência de 40 anos também foi estudado por meio da análise discriminante linear (ADL), usando suas propriedades físicas e químicas. Com base nas variáveis-chave selecionadas (areia fina, areia grossa, carbono orgânico e densidade do solo), a primeira e segunda funções discriminantes lineares explicaram 86% e 13%, respectivamente, da variância total dos tecnossolos ao longo da cronossequência (Figura 20). Os valores de Lambda de Wilks, muito próximos de zero (Tabela 7), indicaram que há diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) entre os grupos formados de tecnossolos ao longo da cronossequência. Este resultado revela a pedogênese inicial de tecnossolos construídos a partir de rejeitos de mineração de scheelita sob clima semiárido, com discriminação perfeita do tecnossolo com 40 anos e baixas sobreposições entre as elipses dos tecnossolos mais jovens (2, 5 e 10 anos) (Figura 20).

**Figura 20.** Análise discriminante linear baseada nas propriedades físicas e químicas de tecnossolos derivados do rejeito de mineração de scheelita no semiárido brasileiro ao longo de uma cronossequência de 40 anos.



**Tabela 7.** Valores de Lambda de Wilks e erro acumulado das variáveis usadas para realização da análise discriminante linear dos tecnossolos derivados do rejeito de mineração de scheelita no semiárido brasileiro

Variáveis	Wilks.lambda	Erro acumulado
Densidade do solo	0,268704	0,32258065
Areia fina	0,1181476	0,16129032
Areia grossa	0,06913451	0,09677419
Carbono orgânico	0,03584802	0,09677419

## 5.2 ESTOQUE DE CARBONO

As concentrações de CO nos horizontes dos primeiros 30 cm de profundidade em P1, P3 e P4 (Tabela 3) foram maiores que as concentrações médias de CO em solos do bioma Caatinga, com cerca de  $9,3 \text{ g kg}^{-1}$  (MENEZES et al., 2012). Vale destacar que o primeiro horizonte do P2 (Auk), com profundidade de 5 cm, apresentou  $23,84 \text{ g kg}^{-1}$  de CO (Figura 21). A faixa de 0-30 cm foi escolhida por se tratar da profundidade de solo que concentra a maior parte do CO, apresentar maiores interferências antrópicas e ser usualmente utilizada em

diversos trabalhos que abordam o CO, permitindo a comparação com outros estudos (BATJES, 1996; BERNOUX et al., 2002; FIDALGO et al., 2012, REES et al., 2019).

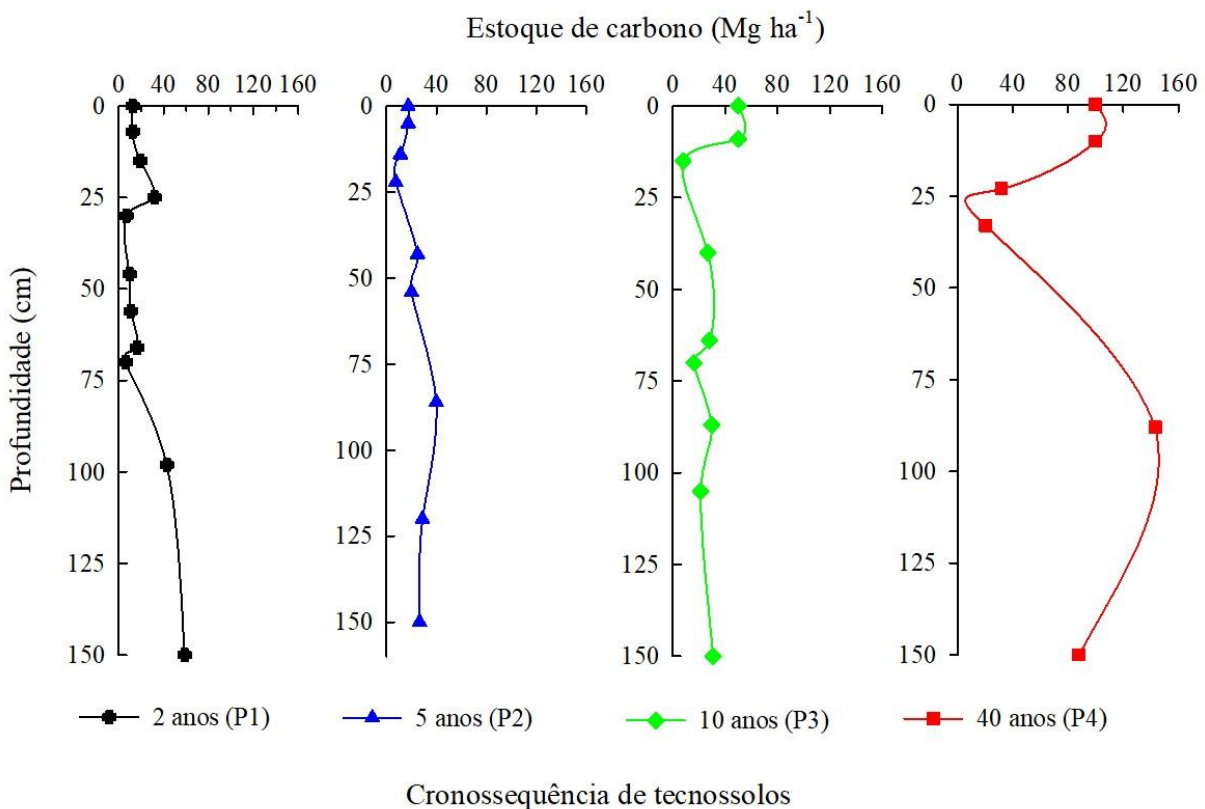
Ao longo da cronosequência de 40 anos, à medida que os tecnossolos foram ficando mais evoluídos, ocorreu incremento do carbono orgânico nos horizontes superficiais, em que o tecnossolo com 40 anos apresentou quatro vezes mais CO ( $67,77 \text{ g kg}^{-1}$ ) do que o tecnossolo com 2 anos ( $15,70 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Tabela 3). O mesmo ocorreu para o estoque de carbono (Figura 21), em que os perfis P1, P2, P3 e P4 estocaram  $12,42 \text{ Mg ha}^{-1}$ ,  $17,19 \text{ Mg ha}^{-1}$ ,  $50,04 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $99,65 \text{ Mg ha}^{-1}$  nos seus horizontes superficiais, respectivamente. De acordo com Sousa et al. (2020), as diferenças de concentrações de CO em solos de regiões semiáridas são influenciadas pela cobertura vegetal, pois promove maior adição de matéria orgânica *in situ* a partir da decomposição de raízes e organismos mortos.

As classes de solos naturais do semiárido brasileiro apresentam os seguintes estoques de carbono até 30 cm de profundidade: PLANOSSOLOS ( $45,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), LUVISSOLOS ( $57,75 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), VERTISSOLOS ( $60,08 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), NEOSSOLOS REGOLÍTICOS ( $28,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e NEOSSOLOS FLÚVICOS ( $43,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (ARAUJO FILHO et al., 2022). Quando comparado ao estoque de carbono dos tecnossolos ao longo da cronosequência estudada, sob mesmo clima e profundidade, observamos que P1 estocou  $\sim 70,03 \text{ Mg ha}^{-1}$ , P2  $\sim 35,43 \text{ Mg ha}^{-1}$ , P3  $\sim 57,85 \text{ Mg ha}^{-1}$  e P4  $\sim 131,38 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Tabela 3, figura 4), apresentando concentrações acima da capacidade de estocar CO que os solos do bioma Caatinga sob vegetação original.

O maior estoque de carbono foi observado em P4 (40 anos)  $\sim 131,38 \text{ Mg ha}^{-1}$ , sendo mais que o dobro da média de estoque de carbono nos Vertissolos ( $60,08 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), classe de solo com maior capacidade de estoque de carbono da região semiárida do Nordeste (ARAUJO FILHO et al., 2022). Em escala nacional, observou-se que o perfil de tecnossolo com 40 anos estocou três vezes mais carbono orgânico ( $131,38 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) do que a média dos solos brasileiros ( $44 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (GOMES et al., 2019). Em partes, a elevada concentração de CO e a alta capacidade de estocar carbono desses tecnossolos ao longo da cronosequência pode ser explicado pela elevada concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  encontrada nesses solos (Tabela 3). O cálcio favorece a formação de agregados no solo (BAKKER; EMERSON; OADES, 1973; MUNEER; OADES, 1989), protegendo o carbono orgânico da decomposição (LÜTZOW et al., 2006) e promovendo a estabilização da matéria orgânica. Ao longo dos 150 cm de profundidade estudados, o estoque de carbono passou de  $214,03 \text{ Mg ha}^{-1}$  no tecnossolo com 2 anos (P1) para  $382,80 \text{ Mg ha}^{-1}$  no tecnossolo com 40 anos (P4), representando um aumento de cerca de 79%. Esse resultado comprova que os tecnossolos derivados da mineração de scheelita apresentam grande potencial para sequestrar carbono a longo prazo no semiárido brasileiro. Isso significa

que esses tecnossolos podem desempenham papel importante na redução dos níveis atmosféricos de  $\text{CO}_2$  e na mitigação das mudanças climáticas. Portanto, a construção desses tecnossolos no semiárido é considerada uma tecnologia importante para melhorar a saúde do solo e combater as mudanças climáticas. Diversos estudos têm demonstrado que existe forte correlação positiva entre o  $\text{Ca}^{2+}$  trocável e a concentração de CO no solo (BERTRAND et al., 2007; CLOUGH; SKJEMSTAD, 2000; SIX et al., 2004). A elevada concentração de cálcio nos perfis de tecnossolos foi herdado do mármore e do tactito, que possuem carbonatos em suas composições mineralógicas (Tabela 5) e estão entre as principais rochas exploradas na atividade de mineração de scheelita. Portanto, sendo os principais materiais de origem formadores do rejeito usado para construir os tecnossolos.

**Figura 21.** Estoque de carbono em tecnossolos derivados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência no semiárido brasileiro.



A região semiárida brasileira é caracterizada pelas altas temperaturas e pouca entrada de matéria orgânica no solo, sendo assim uma região desfavorável à acumulação de CO nos solos (BERNOUX et al., 2002). Entretanto, nessas mesmas condições ambientais, os tecnossolos construídos a partir de rejeitos da atividade de mineração de scheelita atuaram como

importantes reservatórios de C tanto pelo acúmulo da matéria orgânica quanto por estocar grandes quantidades C vegetal originários tanto da deposição de partes aéreas mortas na superfície, como posteriormente incorporadas pela ação da bioturbação (Tabela 6) ou como lixiviação de matéria orgânica dissolvida. Estudos apontam esse processo como um dos mais importantes na pedogênese dos perfis de tecnossolos ao longo de uma cronossequência (REES et al., 2019; RUIZ et al., 2020b).

### 5.3. MINERALOGIA DO SOLO

A composição mineralógica das frações areia fina e grossa, em todos os perfis (Figuras 6 e 7), foram condizentes com a composição do material formador do rejeito usado para construir os tecnossolos (Figura 8), com ampla variedade de minerais primários, compostos principalmente por biotita e feldspatos. A presença desses minerais nas frações areia fina e grossa está relacionada com a ocorrência do grupo dos plagioclásios e microclina na rocha gnáissica (Tabela 5), que é uma das rochas exploradas na atividade de mineração de scheelita, portanto, influenciando na formação do rejeito usado para construir os tecnossolos.

Nas frações areia fina dos perfis P1, P2, P3 e P4 (Figuras 6 e 7) foram observados os minerais actinolita e/ou talco. A presença desses minerais nos tecnossolos foram herdadas do mármore (Tabela 5) – uma das rochas exploradas na mineração e formadora do rejeito. As frações de areia fina dos tecnossolos apresentaram maior diversidade de minerais primários facilmente intemperizáveis quando comparadas às frações areia grossa (Figuras 6 e 7). As variações nas composições mineralógicas dos tecnossolos ao longo da cronossequência também podem estar associadas às finas camadas laminares presentes ao longo dos perfis (Tabela 1), podendo ser resultado da forma de deposição dos rejeitos ao longo dos anos.

A fração argila dos tecnossolos, analisada na forma de pó não orientado (Figura 10), apresentou composição mineralógica rica em minerais primários, semelhante às frações areia fina e grossa, sendo também herdadas dos materiais originários do rejeito. Foram identificadas em todos os horizontes avaliados dos quatro perfis de tecnossolos e em seus respectivos materiais de origem a presença de minerais de argila como esmectitas, indicando a ocorrência dos processos de bissialização. Entretanto, a presença da caulinita no rejeito inicial, indica que esse filossilicato foi herdado do mármore (Figura 14).

A bissialitização nos tecnossolos, processo formador dos argilominerais do tipo esmectita (2:1), está associada à presença de rochas gnáissicas ricas em biotita (17 %), microclina (35 %) e plagioclásios (5 %), bem como de mármore ricos em actinolita e com a

posição da paisagem (relevo plano) que favorece melhor condição de drenagem. Este processo ocorre em locais onde o intemperismo é menos acentuado, como é o caso do semiárido brasileiro (SANTOS et al., 2012; SILVA et al., 2016, FERREIRA et al., 2016; CÂMARA et al., 2021).

Óxidos de ferro foram identificados na fração argila em todos os perfis de tecnossolos (Figura 10). As altas concentrações de Fed (Tabela 3) indicam a ocorrência de fases cristalinas de óxidos de ferro. A caracterização dos óxidos foi dificultada devido à elevada quantidade de minerais primários presentes na fração argila. O principal óxido identificado foi a goethita, que está associada à redução da atividade do ferro na solução, com o aumento da umidade e altas concentrações de carbono orgânico nos horizontes dos tecnossolos. Este mineral pode ter se formado a partir da oxidação do ferro liberado do intemperismo dos minerais primários como a biotita e a actinolita (CORNELL; SCHWERTMANN, 2003).

Em P2, especificamente no horizonte Auk (figura 11) foi observada a presença de clorita com picos de menor expressividade. A ocorrência desse mineral no P2 também pode estar associada aos materiais de origem metamorfizados que formaram o rejeito, que podem ser associados a outros minerais típicos das paragêneses metamórficas de baixo grau, sendo um destes os minerais do grupo da clorita.

Os picos de caulinita e esmectita foram identificados em todos os tecnossolos da cronossequência de 40 anos (Figuras 11 e 12), inclusive no material de origem formador do rejeito (T0) (Figura 13). Esse resultado demonstra que os tecnossolos derivados do rejeito de mineração de scheelita já iniciaram seu desenvolvimento enriquecidos nesses filossilicatos. A identificação dos picos de caulinita e esmectita no difratograma do mármore (Figura 14) – um dos principais materiais formadores do rejeito – comprova que a presença desses filossilicatos nos tecnossolos foi herdada dos seus materiais de origem.

#### **5.4 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO**

O atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) não reconhece os solos de origem antrópica como uma ordem específica de solos, portanto, para fins de classificação, foi utilizado a classificação mundial de solos proposta pela WRB (IUSS Working Group WRB, 2022). Os quatro perfis de tecnossolos formados a partir do rejeito da atividade de mineração de scheelita foram classificados como Spolic Technosol. O qualificador primário Spolic dar-se por se tratar de um perfil formado, em quase sua totalidade, por rejeito da mineração de



scheelita. O subqualificador Loamic foi descrito pela presença da textura franca em todos os perfis de solo, com exceção apenas do horizonte 5Cukz<sub>4</sub> do P1, que apresentou textura argilosa.

Todos os perfis de tecnossolos apresentaram pH em água  $\geq 8,5$  nos 50 cm superiores. As elevadas concentrações de carbonato de cálcio em todos os perfis (Tabela 3) conferiram a eles o subqualificador Calcic. No horizonte Auk (15,70 g kg<sup>-1</sup>) do P1, Auk<sub>1</sub> (23,84 g kg<sup>-1</sup>) do P2 e Auk (41,57 g kg<sup>-1</sup>) do P3 foi observado presença de CO  $\geq 1\%$ , classificando os perfis como Humic. O horizonte Auk (67,77 g kg<sup>-1</sup>) do P4 apresentou concentrações mais elevadas de CO em uma profundidade de 50 cm da superfície do solo mineral, sendo este classificado como Hyperhumic.

Os processos pedogenéticos que ocorrem nos tecnossolos estudados, independente da diversidade dos materiais de origem tecnogênicos, podem ser comparados aos observados em solos naturais (RUIZ et al., 2020b, REES et al., 2019). Nesse sentido, a edição da WRB, publicado pela IUSS, incluiu uma nova classificação de solos antropogênicos (WORKING GROUP WRB, 2006), constituídos pelos grupos dos Antropossolos e Tecnossolos e, mesmo com a inclusão dessa nova classe de solos nos sistemas de classificação de diversos países, até o presente estudo, o SiBCS não possui classificação para solos construídos, apresentando apenas a definição de Horizonte A antrópico (SANTOS et al., 2018). Sabe-se que tecnossolos podem ser utilizados para recuperar ambientes degradados. Muitos estudos no mundo têm confirmado a eficiência desses solos construídos na reabilitação de áreas inativadas pela atividade de mineração (NASCIMENTO et al., 2021; REES et al., 2019; RUIZ et al., 2020b). Contudo, a escassez de pesquisas sobre tecnossolos no Brasil tem refletido na ausência de reconhecimento dessa ordem de solo no atual SiBCS.

## **5.5 POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES AGRÍCOLAS E AMBIENTAIS**

Os tecnossolos derivados de rejeitos da mineração de scheelita, devido à sua origem antrópica, apresentaram distribuição desuniforme dos seus atributos físicos e químicos em profundidade (Tabelas 2 e 3). Em relação aos atributos físicos, o predomínio de texturas mais arenosas impõe algumas limitações ao uso desses tecnossolos para fins agrícolas ou ambientais, por causa da baixa retenção de umidade, que é agravada pela escassez de água na região semiárida. Contudo, o uso de espécies adaptadas às condições de estresse hídrico, demandando menor quantidade de água, associada à aplicação de sistemas de irrigação que maximize a eficiência no uso da água, pode ajudar a superar essas limitações. Vale ressaltar que o perfil de tecnossolo que apresentaram maiores proporções de silte e argila (P1 e P4, Tabela 2),

promoveram maior retenção de cátions (Tabela 3). As frações silte e argila dos tecnossolos influenciaram positivamente na disponibilidade de Ca (0,50 e 0,83,  $p < 0,01$ ), Mg (0,55 e 0,84,  $p < 0,01$ ) e Na (0,51 e 0,66,  $p < 0,01$ ) (Tabela 8). Em contraste, a fração areia fina apresentou forte correlação negativa com esses cátions, ou seja, quanto maior foi a proporção de areia fina nos tecnossolos, menor foi a disponibilidade de Ca (-0,69,  $p < 0,01$ ), Mg (-0,77,  $p < 0,01$ ) e Na (-0,68,  $p < 0,01$ ).

A atividade de argila foi considerada alta, maior que  $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , em todos os perfis (Tabela 3). O P1 apresentou os maiores valores devido à classe textural do perfil conter maior percentual de argila e silte que os demais tecnossolos. A alta atividade de argila é explicada pela presença da esmectita (Figura 11, 12 e 13), argilomineral 2:1 com alta área superficial específica, que conferiu aos tecnossolos maiores retenções de cátions. Aumento da CTC nos tecnossolos ocorreu principalmente pela elevação das proporções das frações argila (0,85,  $p < 0,01$ ) com presença de esmectita. A CTC dos tecnossolos apresentou forte correlação positiva com Ca (0,99,  $p < 0,01$ ), Mg (0,94,  $p < 0,01$ ) e Na (0,79,  $p < 0,01$ ) (Tabela 8).

As concentrações disponíveis de Ca e Mg foram elevadas em todos os perfis de tecnossolos (Tabela 3), estando acima dos seus níveis críticos para a maioria das culturas agrícolas, que é de  $4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  para o Ca e de  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  para o Mg (MUNSON, 1982). A elevada relação Ca/Mg pode causar efeito antagônico na absorção de Mg pelas plantas, sendo uma importante limitação agrícola. As concentrações muito elevadas de Ca nos tecnossolos estão relacionadas à presença de minerais da classe dos carbonatos, a exemplo da calcita, nos principais materiais formadores dos tecnossolos (mármore e tactito, Tabela 5). Solos originados de material carbonático apresentam em comum, a elevada saturação por bases, havendo predomínio dos elementos Ca e Mg e argila de atividade alta, corroborando os resultados obtidos no presente estudo.

A baixa concentração disponível de P nos tecnossolos é uma limitação para a atividade agrícola (Tabela 3). Segundo Gomes e Costa (2008), concentrações de P no solo abaixo de  $11 \text{ mg dm}^{-3}$ , 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). As altas concentrações de P nos horizontes superficiais do P4 ( $61,61 \text{ mg kg}^{-1}$  no Auk e  $23,95 \text{ mg kg}^{-1}$  no Cuk<sub>1</sub>) podem estar relacionadas à presença de esterco de caprino durante a coleta dessas amostras. A maior concentração de CO também evidenciada no

horizonte Auk (67, 77 g kg<sup>-1</sup>), bem como a forte correlação positiva entre o P disponível e o CO (0,93, p<0,01, Tabela 8) corrobora essa explicação.

A baixa concentração disponível de K nos tecnossolos também é uma limitação para a atividade agrícola (Tabela 3). A disponibilidade de K em todos os tecnossolos da cronosequência está abaixo do limite crítico estabelecido para solos sob clima tropical (VAN RAIJ et al., 2001), exceto nos horizontes superficiais do P1 (0,62 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>), P3 (0,46 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) e P4 (0,43 e 0,41 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> nos horizontes Auk e Cuk<sub>1</sub>, respectivamente) (Tabela 3). Houve correlação positiva entre o K disponível e o CO (0,58, p<0,01) (Tabela 8). Isso indica que, possivelmente, as maiores concentrações de K nesses horizontes superficiais podem estar relacionadas à presença de esterco de caprino durante a coleta dessas amostras. Estratégias que promovam a adição de resíduos orgânicos aos tecnossolos, quando disponíveis, devem ser adotadas para elevar a disponibilidade de K.

Apesar da baixa disponibilidade de alguns macronutrientes (Tabela 3), os tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita possuem elevada reserva natural de nutrientes nos minerais primários presentes nas frações areia (Figuras 6, 7 e 8) e argila (Figuras 9, 10, 11, 12 e 13), a exemplo da biotita, feldspatos e actinolita. Assim, esses tecnossolos apresentam potencial de fornecer nutrientes a médio prazo e superar as principais limitações nutricionais para a atividade agrícola. A presença do mineral apatita em um dos materiais formadores (gnaisse, Tabela 5) do rejeito utilizado para construir os tecnossolos pode vir a ser uma importante fonte de P para as plantas.

O caráter alcalino observado nos tecnossolos (Tabela 3) está relacionado à presença de carbonatos na composição do tactito e do mármore (Tabela 5), materiais formadores dos perfis. 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<sup>3+</sup> e Fe<sup>2+</sup> em 1000 e 100 vezes, respectivamente. O pH apresentou forte correlação positiva com Ca (0,51, p<0,01), Mg (0,38, p<0,05) e Na (0,36, p<0,05) (Tabela 7). O Fe<sub>o</sub> e Fe<sub>d</sub> também influenciaram positivamente na disponibilidade de Ca (0,58 e 0,72, p<0,01), Mg (0,62 e 0,71, p<0,01) e Na (0,45 e 0,66, p<0,01 e p<0,05) (Tabela 8).

As concentrações de CO em P1, P2, P3 e P4 aumentaram ao longo da cronosequência (Tabela 3). Em P4, foi obtido o maior teor de CO em superfície, sendo diretamente influenciada pela presença de cobertura vegetal mais arbustiva e estabelecida (Figura 2). Segundo Ussiri et al. (2005) a ausência de cobertura vegetal em áreas de mineração reduz a matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, reduz o carbono orgânico, o estoque de carbono e reflete na

qualidade do solo desde a perda de estrutura que aumenta o risco à erosão até na capacidade de retenção de nutrientes

O alto potencial dos tecnossolos derivados da mineração de scheelita de sequestrar carbono no semiárido brasileiro os tornam ferramentas importantes no combate às alterações climáticas. Em termos de sequestro de carbono, os tecnossolos estudados demonstraram aumentar o estoque de carbono ao longo da cronosequência de 40 anos, permitindo o armazenamento a longo prazo de carbono no solo. Isto comprova que esses tecnossolos desempenham papel importante na redução dos níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico e, conseqüentemente, na atenuação das alterações climáticas.

**Tabela 8.** Correlação de Pearson entre os atributos químicos e físicos dos tecnossolos derivados de rejeitos da mineração de scheelita ao longo de uma cronossequência no semiárido brasileiro

	Argila	Silte	AG	AF	Ds	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CTC	P Olsen	Feo	Fed	CO
Argil	1,00														
Silte	0,57**	1,00													
AG	-0,26	-0,49**	1,00												
AF	-0,84**	-0,77**	0,00	1,00											
Ds	-0,05	-0,36*	0,59**	-0,01	1,00										
pH	-0,36*	-0,38*	0,27	0,33	0,15	1,00									
Ca <sup>2+</sup>	0,83**	0,50**	-0,26	-0,69**	-0,04	-0,51**	1,00								
Mg <sup>2+</sup>	0,84**	0,55**	-0,18	-0,77**	-0,08	-0,38*	0,90**	1,00							
Na <sup>+</sup>	0,66**	0,51**	-0,07	-0,68**	-0,29	-0,36*	0,74**	0,84**	1,00						
K <sup>+</sup>	-0,08	-0,10	0,33	-0,05	-0,14	0,17	0,02	0,09	0,21	1,00					
CTC	0,85**	0,52**	-0,24	-0,73**	-0,06	-0,49**	0,99**	0,94**	0,79**	0,06	1,00				
P Olsen	-0,07	0,18	-0,02	-0,07	-0,10	-0,18	-0,01	0,05	0,12	0,55**	0,02	1,00			
Feo	0,70**	0,75**	-0,35	-0,74**	-0,14	-0,20	0,58**	0,62**	0,45*	-0,20	0,60**	-0,17	1,00		
Fed	0,55**	0,26	0,00	-0,49**	-0,10	-0,09	0,72**	0,71**	0,66**	0,50**	0,74**	0,03	0,40*	1,00	
CO	-0,01	0,25	0,01	-0,17	-0,05	-0,25	0,11	0,18	0,20	0,58**	0,14	0,93**	-0,06	0,12	1,00

\*Significativo a 5% (p<0,05); \*\*Significativo a 1% (p<0,05);

## 6. CONCLUSÕES

Os perfis de tecnossolos construídos a partir de rejeitos da mineração de scheelita apresentaram evolução macromorfológica ao longo da cronosequência de 40 anos, com aumento da espessura dos horizontes superficiais, nítido desenvolvimento de cores e estruturas e homogeneização dos seus horizontes. Esses resultados evidenciam a ocorrência de pedogênese inicial dos tecnossolos derivados da mineração de scheelita sob ambiente semiárido brasileiro. De acordo com a WRB, os perfis de tecnossolos com dois, cinco e dez anos foram classificados como Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic), enquanto o perfil com 40 anos foi descrito como Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic). Com base nas investigações micromorfológicas e macromorfológicas, foram observados desenvolvimentos de processos pedogenéticos específicos, como a exemplo da bioturbação, melanização e pedalização. Ao longo das quatro décadas, houve aumento progressivo do processo de melanização, acompanhado por elevado acúmulo de carbono orgânico. Considerando a faixa de 0-30 cm de profundidade, o perfil de tecnossolo derivado da mineração de scheelita, com 40 anos, apresentou estoque de carbono ( $131,38 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) superior às principais classes de solos naturais do semiárido brasileiro e estocou três vezes mais carbono que a média dos solos brasileiros. Portanto, os tecnossolos estudados possuem grande potencial para sequestrar carbono no semiárido brasileiro. A elevada reserva natural de nutrientes nos minerais primários das frações areia fina, areia grossa e argila, a exemplo da biotita, feldspatos, actinolita e talco, demonstra o alto potencial desses tecnossolos em fornecer elementos essenciais às plantas a médio prazo e superar as principais limitações nutricionais para o desenvolvimento de atividade agrícola. Ademais, a grande diversidade de minerais (biotita, plagioclásios, apatita, microclina, actinolita, epidoto, vesuvianita, powellita, minerais carbonáticos, titanita e minerais opacos) nos materiais formadores do rejeito (tactito, mármore e gnaisse) usado para construir os tecnossolos também podem ser importantes fontes de liberação lenta de nutrientes, capazes de manter a fertilidade dos tecnossolos a longo prazo. A presença de caulinita em todos os tecnossolos da cronosequência, inclusive no rejeito inicial, indica que os perfis iniciaram seu desenvolvimento enriquecido nesse filossilicato. A formação de goethita foi associada à redução da atividade do ferro na solução, com o aumento da umidade e altas concentrações de carbono orgânico nos horizontes dos tecnossolos. A análise discriminante linear demonstrou alto potencial para discriminar os tecnossolos originados de rejeitos da mineração de scheelita, corroborando a ocorrência da pedogênese dos perfis ao longo da cronosequência de 40 anos. À luz da escassez de informações sobre a construção de

tecnossolos derivados da atividade de mineração em ambiente semiárido, este trabalho fornece resultados promissores não apenas para a comunidade científica, mas também para os formuladores de políticas sobre a importância da gestão eficiente dos rejeitos de mineração para recuperar áreas degradadas, fomentar o uso agrícola e gerenciar resíduos em ambientes semiáridos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ARMSTRONG, M.; PETTER, R.; PETTER, C. Why have so many tailings dams failed in recent years? **Resources Policy**, v. 63, p. 1–11, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412>

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.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.190>

BAKKER, A. C.; EMERSON, W. W.; OADES J. M. The comparative effects of exchangeable calcium, magnesium, and sodium on some physical properties of red-brown earth subsoils. III. The permeability of Shepparton soil and comparison of methods. **Australian Journal of Soil Research**, v. 11, 159–165, 1973.  
<https://doi.org/10.1071/sr9730159>

BARREDO, O.; VILELA, J.; GABISU, C.; BESGA, G.; ALKORTA, I.; & EPELDE, L. Technosols made from urban and industrial wastes are a good option for the reclamation of abandoned city plots. **Geoderma**, v. 377, 114563, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114563>

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 metalurgia de chumbo. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 34(1), p. 1413–1426, 2010.  
[https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00002-9](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00002-9)

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 47, p. 151-163, 1996.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>

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.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2002.8880>



BERTRAND, I.; DELFOSSE, O.; MARY, B. Carbon and nitrogen mineralization in acidic, limed and calcareous agricultural soils: Apparent and actual effects. **Soil Biol. Biochem.** v. 39, 276–288, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.016>.

BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. **X-ray Diffraction Procedures for clay mineral Identification**. In: BRINDLEY, G.W; BROWN, G. London: **Mineralogical Society**, chapter 5, p.305-360, 1980.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Albrington: Waine Research, p. 152, 1985.

CAMARA, E. R. G.; SANTOS, J. C. B.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SCHULZE, S. M. B. B.; CORRÊA, M. M.; FERREIRA, T. O.; SOUSA, J. E. S.; SOUZA-JÚNIOR, V. S. Parent rock-pedogenesis relationship: How the weathering of metamorphic rocks influences the genesis of Planosols and Luvisols under a semiarid climate in NE Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 385, p. 1-15, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114878>

CAPRA, G. F.; GANGA, A.; GRILLI, E.; VACCA, S.; BUONDONNO, A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, p. 1602–1618, 2015.

<https://doi.org/10.1007/s11368-015-1110-x>

CARVALHO, E. B.; LIMA, R. F. S.; PETTA, R. A.; DE SOUZA, L. C.; Caracterização de rejeitos provenientes da usina de beneficiamento do minério da mina Brejuí/RN. **XIX ENTMME: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, v.1, p.75, 2002.

CLOUGH, A.; SKJEMSTAD, J. O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. **Soil Res.** v. 38, 1005–1016, 2000.

<https://doi.org/10.1071/SR99102>

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses**. 2nd Edition, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.

<http://dx.doi.org/10.1002/3527602097>

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.

CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Pedology: Soils of Brazilian Biomes**. **Brazilian Soil Science Society**, Minas Gerais, Viçosa (In Portuguese), 2017.

DANA, J. D. **Manual de mineralogia**. Livros técnicos e científicos editora, v. 2, p. 421-422, 1974.

DE KIMPE, C. R.; MOREL, J. L. Urban soil management: a growing concern. **Soil Science**. v. 165, p. 31–40, 2000.

<http://dx.doi.org/10.1097/00010694-200001000-00005>

DIXON, J. B. Kaolin and Serpentine Group Minerals. In: Minerals in Soil Environments Second Edition, DIXON, J.B; WEED, S.B. **Soil Science Society of America**, Inc. 1985, p. 467.

DO CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; DE CAMPOS, I. C.; DO CARMO, F. F.; SILVINO, G.; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N. U. A.; DE SOUZA MIRANDA, M. P.; PINTO, C. E. F. Fundação tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in ecology conservation**, v. 15, p. 145–151, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>

DOMÍNGUEZ-HAYDAR, Y.; CASTAÑEDA, C.; RODRÍGUEZ-OCHOA, R.; JIMÉNEZ, J. J. Assessment of soil fauna footprints at a rehabilitated coal mine using micromorphology and near infrared spectroscopy (NIRS). **Geoderma**, v., p. 313, 135–145, 2018.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.032>

DUCHAUFOR, P. **Pedologie—sol, vegetation, environnement**, 3eth edn. Abreges Masson, Paris, 1991.

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.

<https://doi.org/10.3390/app11083432>

FERNANDES, B. B.; MACHADO, A. O.; LEITE, J. Y. Lixiviação de scheelita – uma revisão do estado da arte. **IV CONNEPI - Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**, Belém - PA, 2009.

FERREIRA, J. T. P.; RIBEIRO FILHO, M. R.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S. D.; BITTAR, S. M. B.; SANTOS, R. G. D. Planosols developed in different geoenvironmental conditions in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1–18, 2016.

<http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20150131>

FIDALGO, E. C. C.; BENITES, V. de M.; WADT, P. G. S.; COELHO, R. M.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A. Estoque de carbono com base no levantamento de solos do Brasil. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. A.; URQUIAGA, S. (ed.). **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, p. 17–32, 2012.

FITZPATRICK, E. A. **Soil microscopy and micromorphology**. New York: J. Wiley & Sons, 1993. 304 p.

FROUZ, J.; ELHOTTOVÁ, D.; KURÁŽ, V.; ŠOURKOVÁ, M. Effects of soil macrofauna on other soil biota and soil formation in reclaimed and unreclaimed post mining sites: results of a field microcosm experiment. **Appl. Soil Ecol.** v. 33, p. 308–320, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.11.001>

FROUZ, J.; ELHOTTOVÁ, D.; PIŽL, V.; TAJOVSKÝ, K.; ŠOURKOVÁ, M.; PICEK, T.; MALÝ, S. The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: a laboratory study. **Appl. Soil Ecol.** v.37, p. 72–80, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.04.001>

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.; JÚNIOR, 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**, v.5, p. 81-90, 2010.

<http://dx.doi.org/10.15628/holos.2010.557>

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.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>

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.

<https://doi.org/10.1007/s11368-018-2142-9>

HOLMGREN, G. G. S. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 31, p. 210-211, 1967.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1967.03615995003100020020x>

HOWARD, J. L.; ORLICKI, K. M. Composition, micromorphology and distribution of microartifacts in anthropogenic soils, Detroit, Michigan, USA. **Catena**, v. 138, p. 103–116, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.016>

HUOT, H.; SIMONNOT, M. O.; MARION P.; YVON J.; DE DONATO P.; MOREL, J. L. Characteristics and potential pedogenetic processes of a Technosol developing on iron industry deposits. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, p. 555–568, 2013.

<https://doi.org/10.1007/s11368-012-0513-1>

HUOT, H.; MOREL, J. L.; SIMONNOT, M. O. Pedogenetic trends in soils formed in technogenic materials. **Soil Science**, v. 180, 182–192, 2015.

<https://doi.org/10.1097/SS.000000000000135>

HUOT, H.; FAURE, P.; BIACHE, C.; LORGEUX, C.; SIMONNOT, M. O.; MOREL, J. L. A Technosol as archives of organic matter related to past industrial activities. **Science of the total environment**, v. 487, p. 389–398, 2014a.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.047>

HUOT, H.; SIMONNOT, M. O.; WATTEAU, F.; MARION, P.; YVON, J.; DE DONATO, P.; MOREL, J. L. Early transformation and transfer processes in a Technosol developing on iron industry deposits. **European Journal Soil Science**, v. 65, p. 470–484, 2014b.

<https://doi.org/10.1111/ejss.12106>

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira**, p.14, 2015.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira**, 2020.

IPEA — Instituto de Pesquisa aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias não energéticas**; Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Ministério do Meio Ambiente: Brasília, Brasil, 2012.

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.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis: advance Course**. Madison, v. 29, p. 895, 1975.

JENNY, H. **Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology**. McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1941.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23a ed. Bookman, 2012.

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.

<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

LAVELLE, P. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. **Adv. Ecol. Res.**, v.24, p. 93–132, 1997.

[https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60007-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60007-0)

LEGUÉDOIS, S.; SÉRÉ, G.; AUCLERC, A.; CORTET, J.; HUOT, H.; OUVARD, S.; WATTEAU, F.; SCHWARTZ, C.; MOREL, J. L. Modeling pedogenesis of Technosols. **Geoderma**, v. 262, p. 199–212, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.008>

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

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.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>

McKEAGUE, J. A.; DAY, J. H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal Science**, v. 46, 1966.

<https://doi.org/10.4141/cjss66-003>

MEDEIROS, M. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Brasil, 2016.

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

<https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clay and clay minerals**, v.7, 1960.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-009235-5.50026-7>

MME — Ministério de Minas e Energia. Boletim Informativo do Setor Mineral, 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36108/406012/Boletim+Informativo+do+Setor+Mineral+2018+-+English+Version.pdf/67707fd3-fd82-9e87-c9ca-86fadff93be0> (acessado em 5 de dezembro de 2019).

MOORE, D. M.; REYNOLDS JR., R. C. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. **Oxford University Press**, Oxford, v. 4, p.179-201, 1997.

MONASTERSKY, R. Anthropocene: The human age. **Nature**, v. 519, p. 144–147, 2015.

<https://doi.org/10.1038/519144a>

MUNEER, M.; OADES, J. M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability.III. Mechanisms and models. **Australian Journal of Soil Researc**, v. 27, 411–423, 1989.

<https://doi.org/10.1071/SR9890411>

MUNSON, R. D. Potassium, calcium, and magnesium in the tropics and subtropics. Technical Bulletin. Intern Fert Dev Center, 1982.

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 Agronômica**, v. 37, p. 7–12, 2006. (in Portuguese).

MURPHY, C. P. Thin Section Preparation of Soils and Sediments. **Academic Publis**, Berkhamsterd, p.145, 1986.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1987.tb02834.x>

NASCIMENTO, A. R. V. J.; CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA, K. P. V. Assessing Soil Quality and Heavy Metal Contamination on Scheelite Mining Sites in a Tropical Semi-arid Setting. **Water Air Soil Pollut**, 232:375, 2021.

<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05299-6>

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.

<https://doi.org/10.1093/aob/mcw191>

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**, p. 403-430, 1982.

PETTA, R. A.; SINDERN, S.; SOUZA, R. F.; CAMPOS, T. F. C. Influence of mining activity on the downstream sediments of scheelite mines in Currais Novos (NE Brazil). **Environmental Earth Sciences**, v. 72, p. 1843-1852, 2014.

<https://doi.org/10.1007/s12665-014-3093-0>

POUYAT, R. V.; SZLAVECZ, K.; YESILONIS, I. D.; GROFFMAN, P. M.; SCHWARZ, K. **Chemical, physical, and biological characteristics of urban soils**. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison. Agronomy Monograph vol. 55, p. 119–152, 2010.

<https://doi.org/10.2134/agronmonogr55.c7>

PRUVOST, C.; MATHIEUA, J.; NUNANA, N.; GIGONA, A.; PANDOA, A.; LERCHA, T.Z.; BLOUINB, M. Tree growth and macrofauna colonization in Technosols constructed from recycled urban wastes. **Ecological Engineering**, v.153, 105886, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105886>

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.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.009>

RICHTER, D. D. E. B.; BACON, A. R.; MEGAN, L. M.; RICHARDSON, C. J.; ANDREWS, S. S.; WEST, L.; WILLS, S.; BILLINGS, S.; CAMBARDELLA, C. A.; CAVALLARO, N.; DEMEESTER, J. E.; FRANZLUEBBERS, A. J.; GRANDY, A. S.; GRUNWALD, S.; GRUVER, J.; HARTSHORN, A. S.; JANZEN, H.; KRAMER, M. G.; LADHA, J. K.; LAJTHA, K.; LILES, G. C.; MARKEWITZ, D.; MEGONIGAL, P. J.; MERMUT, A. R.; RASMUSSEN, C.; ROBINSON, D. A.; SMITH, P.; STILES, C. A.; TATE, R. L.; THOMPSON, A.; TUGEL, A. J.; VAN ES, H.; YAALON, D.; ZOBECK, T. M. Human–Soil Relations are Changing Rapidly: Proposals from SSSA’s Cross-Divisional Soil Change Working Group. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, p. 2079–2084, 2011.

<https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0124>

ROKIA, S.; SÉRE, G.; SCHWARTZ, C.; DEEB, M.; FOURNIER, F.; NEHLS, T.; DAMAS, O.; VIDAL-BEAUDET, L. Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. **Waste Management**, v. 34, p. 2155-2162, 2014.



<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.016>

ROSSITER, D. G. **Proposal for a new reference group for the World Reference Base for Soil Resources (WRB) 2006: the Technosols 2 nd revised draft.** Work. Gr. Technosols WRB 16, 2006.

RUIZ, F. **Weathering and incipient pedogenesis of Technosols constructed from dolomitic limestone mine spoils.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo ESALQ/USP), Universidade de São Paulo, São Paulo, Piracicaba, 2019.

RUIZ, F.; CHERUBIN, M. R.; FERREIRA, T. O. Soil quality assessment of constructed Technosols: towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. **Journal Environmental Management**, v. 276, 111344, 2020c.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111344>

RUIZ, F.; PERLATTI, F.; OLIVEIRA, D. P.; FERREIRA, T. O. Revealing tropical technosols as an alternative for mine reclamation and waste management. **Minerals**, v. 10, p. 110, 2020a.

<https://doi.org/10.3390/min10020110>

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, 2020b.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114439>

RUIZ, F.; ANDRADE, G. R. P. A.; RESMINI SARTOR, L.; CHEYSON BARROS DOS SANTOS, J.; DE SOUZA JÚNIOR, V. S.; OSÓRIO FERREIRA. The rhizosphere of tropical grasses as driver of soil weathering in embryonic Technosols (SE-Brazil). **Catena**, v. 208, p. 105764, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105764>

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, 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)

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

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.006>

SANTOS, J. C. B.; SOUZA-JÚNIOR, V.S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de neossolos regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 683-696, 2012.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300001>

SANTOS, J. C. B.; SOUZA-JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de neossolos regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 683-696, 2012.



<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300001>

SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, p.356, 2018.

SANTOS, E. S.; ABREU, M. M.; MACÍAS, F. Rehabilitation of mining areas through integrated biotechnological approach: Technosols derived from organic/inorganic wastes and autochthonous plant development. **Chemosphere**, v. 294, p. 765–775. 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.172>

SCHAD, P. Technosols in the World Reference Base for Soil Resources–history and definitions. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 64, p. 138–144, 2018.

<https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1432973>

SENRA, E. O.; SCHAEFER, C. E.; CORRÊA, G.R.; GJORUP, D.F.; REIS, J.S.; FRANCELINO, M.R. Holocene pedogenesis along a chronotoposequence of soils from the Altiplano to the Cordillera Real, Bolivian Andes. **Catena**, 178, 141–153, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.012>

SÉRÉ, G.; SCHWARTZ, C.; OUVRARD, S.; RENAT, J. C.; WATTEAU, F.; VILLEMEN, G.; MOREL, J. L. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. **Journal Soils and Sediments**, v. 10, p. 1246–1254, 2010.

<https://doi.org/10.1007/s11368-010-0206-6>

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

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>

SOKOLOV, D. A.; ANDROKHANOV, V. A.; KULIZHSKII, S. P.; DOMOZHAKOVA, E. A.; LOIKO, S.V. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia. **Eurasian Soil Science.**, v. 48, p. 95–105, 2015.

<https://doi.org/10.1134/S1064229315010159>

SOUSA, J. E. S.; SANTOS, J. C. B.; CORREA, M. M.; NASCIMENTO, A. F.; SCHULZE, S. M. B. B.; FERREIRA, T. O.; ARAUJO FILHO, J. C.; SOUZA JUNIOR, V. S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. **Catena**, v. 184, p. 1-10, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104260>

STOOPS, G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections, Second Edition. **American Society of Agronomy**, United States, 2020.

SUDENE. **Delimitação do Semiárido**, 2017.

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.

THOMPSON, F.; DE OLIVEIRA, B. C.; CORDEIRO, M. C.; MASI, B. P.; RANGEL, T. P.; PAZ, P.; FREITAS, T.; LOPES, G.; SILVA, B. S.; CABRAL, A. S.; SOARES, M.; LACERDA, D.; VERGILIO, A. S.; LOPES-FERREIRA, M.; LIMA, C.; THOMPSON, C.; REZENDE, C. E. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **The Science of the total Environment**, v. 705, 135914, 2020.

<https://doi.org/10.1134/S1064229315010159>

USSIRI, D. A. N.; LAL, R. Carbon sequestration in reclaimed minesoils. **Crit. Rev. Plant Sci**, v. 24, p. 151–165, 2005.

<https://doi.org/10.1080/07352680591002147>

UZAROWICZ, L.; WOLIŃSKA<sup>b</sup>, A.; BLOŃSKA<sup>c</sup>, E.; SZAFRANEK-NAKONIECZNA<sup>b</sup>, A.; KUŹNIAR<sup>b</sup>, A.; SŁODCZYK<sup>aa</sup>, Z.; KWASOWSKI<sup>a</sup>, W. Technogenic soils (Technosols) developed from mine spoils containing Fe sulphides: Microbiological activity as an indicator of soil development following land reclamation. **Applied Soil Ecology**, v. 156, 103699, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103699>

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Inst. Agron., Campinas, SP, 2001.

VILLENAVE, C.; SÉRÉ, G.; SCHWARTZ, C.; WATTEAU, F.; JIMENEZ, A.; CORTET, J. Rapid changes in soil nematodes in the first years after technosol construction for the remediation of an industrial wasteland. **Eurasian Soil Science**, v. 51, p. 1266–1273, 2018.

<https://doi.org/10.1134/S1064229318100149>

WEISSERT, L. F.; SALMOND, J. A.; SCHWENDENMANN, L. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO<sub>2</sub> efflux across urban land use and soil cover types. **Geoderma**, v. 271, p. 80–90, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.014>

WILKINSON, M. T.; RICHARDS, P. J.; HUMPHREYS, G. S. Breaking ground: pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation. **Earth Sci. Ver**, v. 97, p. 257–272, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.09.005>

WRB, WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES. A framework for international classification, correlation and communication, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. **World soil resources reports**, 103, 2006.

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.

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

YILMAZ, D.; CANNAVO, P.; SÉRÉ, G.; VIDAL-BEAUDET, L.; LEGRET, M.; DAMAS, O.; PEYNEAU, P.E. Physical properties of structural soils containing waste materials to achieve urban greening. **Journal. Soils and Sediments**, p. 1–14, 2016.

<https://doi.org/10.1007/s11368-016-1524-0>

**APÊNDICE A – Dados morfológicos dos perfis**

## A- DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 1 – 2 anos

**DATA:** 09/06/2022

**CLASSIFICAÇÃO:** Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic)

**LOCALIZAÇÃO:** Bacia de rejeito fino da Mina Brejuí com coordenada 06°19'29,6''S e 36°32'52,5'' W

**LENÇOL FREÁTICO:** Ausente

**SITUAÇÃO E DECLIVIDADE:** Topo plano de recobrimento sedimentar de rejeito de mineração sob uma área escavada no embasamento cristalino com declividade entre 0-2,5%

**ALTITUDE:** 338 metros (GPS)

**LITOLOGIA:** Mármore, Gnaisse e Tactito

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Seridó – Cordierita, silimanita, andaluzita e/ou estauroлита xistos porfiroblásticos.

**CRONOLOGIA:** Mesoproterozóico

**MATERIAL DE ORIGEM:** Rejeito de mineração de Scheelita com granulometria <2mm

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa

**ROCHOSIDADE:** Não rochoso.

**RELEVO LOCAL:** Plano.

**RELEVO REGIONAL:** Suave ondulado e plano.

**EROSÃO:** Não aparente

**DRENAGEM:** Moderadamente drenado

**VEGETAÇÃO LOCAL:** Próximo ao local ocorrem algarobas

**VEGETAÇÃO REGIONAL:** Caatinga Hiperxerófila (Caatingueira, faveleira, cactos (xique xique), coroa de frade, quipá, jurema preta, facheiro, brejuí (quase em extinção e foi que deu origem ao nome da mina)

**USO ATUAL:** Gramíneas

**CLIMA:** BSh, da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** José Coelho de Araújo Filho, Valdomiro Severino de Souza Júnior, Rayanna Jacques Agra Bezerra da Silva.

## B- DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**Auk- (0-7 cm)** – Bruno (7,5YR 4/3, úmida); Franco-arenoso, fraca, pequena e média, granular e bloco subangular, consistência friável, plástica, pegajosa e transição abrupta e ondulada.

**2Cuk1- (7-15 cm)** – Bruno (7,5YR 5/3, úmida); Franco-argilosa, fraca, pequena e média, laminar, consistência friável, muito plástica, pegajosa e transição abrupta e ondulada.

**3Cuk2- (15-25 cm)** – Bruno (7,5YR 5/3, úmida); Franco-argilosa-siltoso, fraca, pequena e média, laminar, consistência friável e firme, muito plástica, pegajosa e transição abrupta e ondulada.

**4Cuk3- (25-30 cm)** – Cinza (5Y 6/1, úmida); Franca, fraca, pequena e média, laminar, consistência friável, ligeiramente plástica, não pegajosa e transição abrupta e plana.

**5Cuk4- (30-46cm)** – Bruno (7,5YR 5/3, úmida); Argila, fraca, pequena e média, laminar, consistência úmida friável e firme, muito plástica, pegajosa e transição abrupta e plana.

**6Cuk5- (46-56cm)** – Amarelo claro (2,5Y 7/3, úmida); Franco-argilo-arenosa, fraca, pequena e média, laminar, consistência muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa e transição abrupta e plana.

**7Cuk<sub>6</sub>-(56-66 cm)** – Bruno-amarelo (10YR 5/4, úmida); Franco argilosa, fraca, pequena e média, laminar, consistência friável e firme, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa e transição abrupta e plana.

**8Cuk<sub>7</sub>-(66-70 cm)** – Cinza-claro (5Y 7/2, úmida); Franco-siltosa, fraca, pequena e média, laminar, consistência friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa e transição abrupta e plana.

**9Cuk<sub>8</sub>-(70-98 cm)** – Bruno-claro (10YR 6/3, úmida); Franco-siltosa, fraca, pequena e média, laminar, consistência friável e firme, plástica, pegajosa e transição abrupta e ondulada.

**10Cuk<sub>9</sub> - (98-150 cm)** – Cinza-claro (5Y 7/2, úmida); Franco-arenosa, fraca, pequena e média, laminar, consistência muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa.

**RAÍZES** – ocorreram raízes comuns, finas e médias no horizonte Auk; raízes comuns, finas nas camadas 2Cuk<sub>1</sub>, 3Cuk<sub>2</sub> e 4Cuk<sub>3</sub>; poucas e finas nas camadas 5Cuk<sub>4</sub>, 6Cuk<sub>5</sub>, 7Cuk<sub>6</sub> e 8Cuk<sub>7</sub>; raras e finas nas camadas 9Cuk<sub>8</sub>, 10Cuk<sub>9</sub>.

#### **OBSERVAÇÕES –**

1. Ao longo do perfil predomina pequenos fragmentos milimétricos e micrométricos, brilhantes, semelhantes a mica;
2. Entre as camadas Auk e 2Cuk<sub>1</sub>, assim como, 3Cuk<sub>2</sub> e 4Cuk<sub>3</sub>, ocorreu uma fina camada de material claro (acimentado) com espessura média 1cm.
3. As camadas individualizadas ao longo do perfil não são homogêneas em termo de cor.
4. Para fins práticos de caracterização foi utilizado a coloração predominante na camada.
5. Muitos poros pequenos a muito pequenos ao longo do perfil.
6. Efervescência por reação ao ácido clorídrico (HCl) a 10% em todos os horizontes com reação semelhante aos causados em mármore local.
7. Solo descrito no estado úmido com partes iniciando secagem.

## A- DESCRIÇÃO GERAL

**PERFIL 2 – 5 anos**

**DATA:** 09/06/2022

**CLASSIFICAÇÃO:** Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic)

**LOCALIZAÇÃO:** Bacia de rejeito fino da Mina Brejuí com coordenada 06°19'30,2''S e 36°32'51,4'' W

**LENÇOL FREÁTICO:** Ausente

**SITUAÇÃO E DECLIVIDADE:** Topo plano de recobrimento sedimentar de rejeito de mineração sob uma área escavada no embasamento cristalino com declividade entre 0-2,5%. Posição ligeiramente mais elevada que o Perfil 1.

**ALTITUDE:** 348 metros (GPS)

**LITOLOGIA:** Mármore, Gnaisse e Tactito

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Seridó – Cordierita, silimanita, andaluzita e/ou estauroлита xistos porfiroblásticos.

**CRONOLOGIA:** Mesoproterozóico

**MATERIAL DE ORIGEM:** Rejeito de mineração de Scheelita com granulometria <2mm

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa

**ROCHOSIDADE:** Não rochoso.

**RELEVO LOCAL:** Plano.

**RELEVO REGIONAL:** Suave ondulado e plano.

**EROSÃO:** Não aparente

**DRENAGEM:** Acendualmente drenado/Bem drenado

**VEGETAÇÃO LOCAL:** Floresta de algarobas

**VEGETAÇÃO REGIONAL:** Caatinga Hiperxerófila (Caatingueira, faveleira, cactos (xique xique), coroa de frade, quipá, jurema preta, facheiro, brejuí (quase em extinção e foi que deu origem ao nome da mina)

**USO ATUAL:** Algaroba

**CLIMA:** BSh, da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** José Coelho de Araújo Filho, Valdomiro Severino de Souza Júnior, Rayanna Jacques Agra Bezerra da Silva.

## B- DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**Auk<sub>1</sub>- (0-5 cm)** – Bruno-escuro (10YR 4/1, úmida); Franco-arenosa, fraco e moderado, pequena e média, bloco sub-angular, muito friável, ligeiramente plástico, não pegajoso, transição clara e plana.

**Auk<sub>2</sub>- (5-14 cm)** – Bruno-claro (10YR 7/2, úmida); Franco-arenosa, granular simples, fraco e moderado, bloco sub-angular, pequena e média, muito friável, não plástico, não pegajoso, transição abrupta e plana.

**2Cuk<sub>1</sub>-(14-22 cm)** – Bruno (7,5YR 5/3, úmida); Areia-franca, granular simples e fraco, pequena e média, tamanho de pequeno e média, laminar, muito friável, não plástico, não pegajoso, transição abrupta e plana.

**3Cuk<sub>2</sub>-(22-43 cm)** – Bruno-claro (10YR 6/3, úmida); Franco-arenosa, fraco, pequena e média, laminar, muito friável e friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso, transição abrupta e plana.

**4Cuk<sub>3</sub>-(43-54 cm)** – Bruno (7,5YR 5/3, úmida); Franco-argilosa, fraco e moderado, média, laminar, firme, ligeiramente plástico, não pegajoso, transição abrupta e plana.

**5Cuk<sub>4</sub>-(54-86 cm)** – Bruno-claro (10YR 7/2, úmida); Franco-arenosa, fraco, pequena e média, laminar, muito friável, não plástico, não pegajoso, transição abrupta e plana.

**6Cuk<sub>5</sub>-(86-120 cm)** – Bruno-claro (10YR 6/3, úmida); Areia-franca, fraco, pequena e média, laminar, muito friável, não plástico, não pegajoso, transição abrupta e plana

**7Cuk<sub>6</sub> (120-150 cm)** – Bruno-acinzentado-claro (2,5Y 6/2, úmida); Areia-franca, fraco, pequena e média, laminar, muito friável, ligeiramente plástico, não pegajoso.

**RAÍZES** – ocorreram raízes muito finas e poucas médias nos horizontes Auk<sub>1</sub>, Auk<sub>2</sub> e 2Cuk<sub>1</sub>; comuns finas e raras médias no horizonte 3Cuk<sub>2</sub>; poucas e finas no horizonte 4Cuk<sub>3</sub>, 5Cuk<sub>4</sub> e 6Cuk<sub>5</sub>; raras e finas n horizonte 7Cuk<sub>6</sub>

#### **OBSERVAÇÕES –**

1. Solo descrito no estado úmido com partes iniciando secagem
2. Ao longo do perfil predomina pequenos fragmentos milimétricos e micrométricos, brilhantes, semelhantes a mica;
3. Muitos poros pequenos a muito pequenos ao longo do perfil
4. As camadas individualizadas ao longo do perfil não são homogêneas em termo de cor.
5. Para fins práticos de caracterização foi utilizado a coloração predominante na camada.
6. Efervescência por reação ao ácido clorídrico (HCl) a 10% em todos os horizontes com reação semelhante aos causados em mármore local.



## A- DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 3 – 10 anos

**DATA:** 09/06/2022

**CLASSIFICAÇÃO:** Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Humic)

**LOCALIZAÇÃO:** Bacia de rejeito fino da Mina Brejuí com coordenada 06°19'29,4''S e 36°32'46'' W

**LENÇOL FREÁTICO:** Ausente

**SITUAÇÃO E DECLIVIDADE:** Topo plano de recobrimento sedimentar de rejeito de mineração sob uma área escavada no embasamento cristalino com declividade entre 0-2,5%. Posição ligeiramente mais elevada que o Perfil 1.

**ALTITUDE:** 341 metros (GPS)

**LITOLOGIA:** Mármore, Gnaisse e Tactito

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Seridó – Cordierita, silimanita, andaluzita e/ou estauroлита xistos porfiroblásticos.

**CRONOLOGIA:** Mesoproterozóico

**MATERIAL DE ORIGEM:** Rejeito de mineração de Scheelita com granulometria <2mm

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa

**ROCHOSIDADE:** Não rochoso.

**RELEVO LOCAL:** Plano.

**RELEVO REGIONAL:** Suave ondulado e plano.

**EROSÃO:** Não aparente

**DRENAGEM:** Acendualmente drenado/Bem drenado

**VEGETAÇÃO LOCAL:** Gramíneas e algarobas

**VEGETAÇÃO REGIONAL:** Caatinga Hiperxerófila (Caatingueira, faveleira, cactos (xique xique), coroa de frade, quipá, jurema preta, facheiro, brejuí (quase em extinção e foi que deu origem ao nome da mina)

**USO ATUAL:** Pastagem natural

**CLIMA:** BSh, da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** José Coelho de Araújo Filho, Valdomiro Severino de Souza Júnior, Rayanna Jacques Agra Bezerra da Silva.

## B- DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**Auk- (0-9 cm)** – Bruno (7,5YR 5/3, úmida); Franco-arenosa, fraco, pequena e média, bloco sub-angular, muito friável, ligeiramente plástico, não pegajoso, abrupta e plana.

**2Cuk<sub>1</sub>-(9-15 cm)** – Cinza-claro (2,5Y 7/2, úmida); Franco-arenosa, fraco, pequena e média, laminar, muito friável, não plástico, não pegajoso, abrupta e plana.

**3Cuk<sub>2</sub>-(15-40 cm)** - Cinza-claro (2,5Y 7/1, úmida); Franco-arenosa, fraco, pequena e média, laminar, muito friável, não plástico, não pegajoso, abrupta e plana.

**4Cuk<sub>3</sub>-(40-64 cm)** – Bruno-claro (10YR 6/3, úmida); Franco-arenosa, fraco, pequena e média, laminar, friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso, abrupta e plana.

**5Cuk<sub>4</sub>-(64-70 cm)** – Bruno (7,5YR 4/3, úmida); Franca, fraco e moderado, pequena e média, laminar, friável e firme, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso, abrupta e plana.

**6Cuk<sub>5</sub>-(70-87 cm)** – Bruno-claro (7,5YR 6/3, úmida); Areia-Franca, fraco, pequena e média, laminar, muito friável e friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso, abrupta e plana.

**7Cuk<sub>6</sub>-(87-105 cm)** – Bruno (7,5YR 5/3, úmida); Franco-arenosa, fraco, pequena e média, laminar, muito friável, ligeiramente plástico, não pegajoso, abrupta e plana.

**8Cuk<sub>7</sub>-(105-150 cm)** – Bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida); Franco-arenosa, fraco, pequena e média, laminar, muito friável, ligeiramente plástico, não pegajoso.

**RAÍZES** – muito finas, poucas médias e raras grossas nos horizontes Auk e 2Cuk<sub>1</sub>; comuns finas, raras médias e raras grossas nos horizontes 3Cuk<sub>2</sub> e 4Cuk<sub>3</sub>; comuns finas no horizonte 5Cuk<sub>4</sub>; raras finas nos horizontes 6Cuk<sub>5</sub>, 7Cuk<sub>6</sub> e 8Cuk<sub>7</sub>

**OBSERVAÇÕES** –

1. Entre as camadas Auk<sub>2</sub> e 2Cuk<sub>1</sub>, ocorreu uma fina camada de material claro (acimentado) com espessura média 1 a 2cm.
2. Solo descrito no estado úmido com partes iniciando secagem
3. Ao longo do perfil predomina pequenos fragmentos milimétricos e micrométricos, brilhantes, semelhantes a mica;
4. Muitos poros pequenos a muito pequenos ao longo do perfil
5. As camadas individualizadas ao longo do perfil não são homogêneas em termo de cor.
6. Para fins práticos de caracterização foi utilizado a coloração predominante na camada.
7. Efervescência por reação ao ácido clorídrico (Hcl) a 10% em todos os horizontes com reação semelhante aos causados em mármore local.
8. Entre as camadas 5Cuk<sub>4</sub> e 6Cuk<sub>5</sub> ocorre uma fina camada de material claro de natureza mais arenosa que as camadas vizinhas (acimentado com espessura de 3 a 4m)
9. Entre as camadas 6Cuk<sub>5</sub> e 7Cuk<sub>6</sub> ocorre uma fina camada de material claro de natureza mais arenosa que as vizinhas (acimentado com espessura de 1cm)
10. Não foi verificado atração magnética ao longo do perfil
11. Na camada 2Cuk<sub>1</sub> ocorreu uma coloração amarelada entre as estruturas laminares (10 YR 5/6) de forma descontínua.

## A- DESCRIÇÃO GERAL

### PERFIL 4 – 40 anos

**DATA:** 09/06/2022

**CLASSIFICAÇÃO:** Spolic Technosol (Loamic, Alcalic, Calcic, Hyperhumic)

**LOCALIZAÇÃO:** Bacia de rejeito fino da Mina Brejuí com coordenada 06°19'33''S e 36°32'45,7'' W

**LENÇOL FREÁTICO:** Ausente

**SITUAÇÃO E DECLIVIDADE:** Topo plano de recobrimento sedimentar de rejeito de mineração sob uma área escavada no embasamento cristalino com declividade entre 0-2,5%. Posição ligeiramente mais elevada que o Perfil 1.

**ALTITUDE:** 341 metros (GPS)

**LITOLOGIA:** Mármore, Gnaisse e Tactito

**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Formação Seridó – Cordierita, silimanita, andaluzita e/ou estauroлита xistos porfiroblásticos.

**CRONOLOGIA:** Mesoproterozóico

**MATERIAL DE ORIGEM:** Rejeito de mineração de Scheelita com granulometria <2mm

**PEDREGOSIDADE:** Não pedregosa

**ROCHOSIDADE:** Não rochoso.

**RELEVO LOCAL:** Plano.

**RELEVO REGIONAL:** Suave ondulado e plano.

**EROSÃO:** Não aparente

**DRENAGEM:** Bem drenado/ Moderadamente drenado (possui camada argilosa dificultando a infiltração de água).

**VEGETAÇÃO LOCAL:** Algaroba e vegetação rasteira

**VEGETAÇÃO REGIONAL:** Caatinga Hiperxerófila (Caatingueira, faveleira, cactos (xique xique), coroa de frade, quipá, jurema preta, facheiro, brejuí (quase em extinção e foi que deu origem ao nome da mina)

**USO ATUAL:** Algaroba, vegetação rasteira nativa

**CLIMA:** BSh, da classificação de Köppen.

**DESCRITO E COLETADO POR:** José Coelho de Araújo Filho, Valdomiro Severino de Souza Júnior, Rayanna Jacques Agra Bezerra da Silva.

## B- DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

**Auk- (0-10 cm)** - Bruno (7,5YR 4/3, úmida); Franco-arenosa; fraco, moderado; pequena, média, bloco sub-angular; muito friável; ligeiramente plástico; não pegajoso; transição clara e plana.

**Cuk<sub>1</sub>-(10-23 cm)** - Bruno (7,5YR 5/3, úmida); Areia-franca; fraca; pequena, média; bloco sub-angular; muito friável; não plástico; não pegajoso; transição abrupta ondulada.

**Cuk<sub>2</sub>-(23-33 cm)** - Bruno (10YR 5/3, úmida); Franco-arenosa; fraco, moderado; pequena, média, bloco sub-angular; muito friável e friável; ligeiramente plástico; ligeiramente pegajoso; transição abrupta ondulada.

**2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub>-(33-88 cm)** - Bruno (7,5YR 4/3, úmida); Franco-argilosa; moderada, forte; média grande; bloco subangular, bloco angular; firme e muito firme; muito plástico; muito pegajoso; transição abrupta ondulada.

**3Cuk (88-150 cm)** - Bruno-claro (10YR 6/3, úmida); Franco-arenosa; fraca; pequena, média; bloco sub-angular; muito friável; ligeiramente plástico; não pegajoso; transição abrupta ondulada.

**RAÍZES** – Muitas raízes finas, poucas médias e raras grossas nos horizontes Auk, Cuk<sub>1</sub>; no horizonte Cuk<sub>2</sub> possuem poucas grossas e no horizonte 3Cuk são raízes raras finas.

#### **OBSERVAÇÕES –**

1. Solo descrito no estado úmido com partes iniciando secagem
2. Muitos poros pequenos e muito pequenos nos horizontes Auk, Cuk<sub>1</sub>, Cuk<sub>2</sub> e 3Cuk. Na camada 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> apresenta muitos poros pequenos e poucos pequenos
3. Na camada 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> ocorrem fragmentos com estrutura laminar desordenada em uma proporção inferior à 5% do volume de 7 a 10cm de comprimento com espessura de 1 a 3cm.
4. Efervescência por reação ao ácido clorídrico (Hcl) a 10% em todos os horizontes com reação semelhante aos causados em mármore local.
5. Na camada 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> o material envolvente reage com o Hcl em uma intensidade mais forte em relação com o material envolvido.
6. O material envolvente na na camada 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> apresenta-se com estrutura mais branda em relação ao envolvido que mesmo com pouca umidade apresenta consistência de muito dura a extremamente dura de forma irregular e maciça.
7. Na camada 2Cuk<sub>1</sub>/Cuk<sub>2</sub> observou-se a presença de frações grossas ao longo do perfil que compreendem matações de mármore de 10 a 25cm quartzo de 3 a 6cm. O volume de frações grossas no horizonte ocupa de 3 a 5% (mármore com cerca de 2% e 3% para as demais frações grossas; menos de 1% corresponde a fragmentos de rochas metamórficas muito alteradas que reagem fracamente com o Hcl com dimensão de 2-12cm.
8. Para fins práticos de caracterização foi utilizado a coloração predominante na camada.
9. As camadas individualizadas ao longo do perfil não são homogêneas em termo de cor.
10. Não foi verificado atração magnética ao longo do perfil