

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS ARGILAS PRESENTES NO PERFIL
REGOLÍTICO DOS DEPÓSITOS SUPERGÊNICOS DE ETR SOBERBO E CAPÃO
DO MEL (SISTEMA CALDEIRA)**

Flávia Pereira Ribeiro

Prof. Dr. Rodrigo Prudente de Melo

Profa. Dra. Carolina Del Roveri

Rio Claro - SP

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

FLÁVIA PEREIRA RIBEIRO

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS ARGILAS
PRESENTES NO PERFIL REGOLÍTICO DOS DEPÓSITOS
SUPERGÊNICOS DE ETR SOBERBO E CAPÃO DO MEL
(SISTEMA CALDEIRA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Rio Claro - SP

2024

R484c

Ribeiro, Flávia Pereira

Caracterização mineralógica das argilas presentes no perfil regolítico dos depósitos
supergênicos de ETR Soberbo e Capão do Mel (Sistema Caldeira) / Flávia Pereira

Ribeiro. -- Rio Claro, 2024

75 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Rodrigo Prudente de Melo

Coorientadora: Carolina Del Roveri

1. Elementos Terras Raras. 2. Complexo Alcalino de Poços de Caldas. 3. Argila
Iônica. 4. Perfil Regolítico. I. Título.

Flávia Pereira Ribeiro

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS ARGILAS
PRESENTES NO PERFIL REGOLÍTICO DOS DEPÓSITOS
SUPERGÊNICOS DE ETR SOBERBO E CAPÃO DO MEL
(SISTEMA CALDEIRA)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Rodrigo Prudente de Melo (orientador)

Profa. Dra. Carolina Del Roveri (co-orientadora)

Geol. Vinicius Gomes Rodrigues

Geol. Dr. Iata Anderson de Souza

Rio Claro, 19 de novembro de 2024



Assinatura do(a) aluno(a)



assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Rodrigo Prudente de Melo, por ter encontrado espaço para mais um trabalho nesse último ano, isso mudou totalmente o rumo da minha graduação. Sou muito grata pelo aprendizado e também pelos conselhos, conversas e risadas junto com o Victor Hugo e Enzo nas nossas atividades de campo. Agradeço à Carolina Del Roveri, por toda a paciência, parceria e conversas desses últimos meses e à UNIFAL, por todo o apoio prestado a esta pesquisa. Ao Iata e o pessoal da UNESPetro, por toda a ajuda na preparação de amostras, análise e interpretação dos dados e por toda a estrutura, conversas e cafés oferecidos. Também agradeço a UNESP e aos meus professores. Sem vocês, esse trabalho não poderia ser finalizado da forma que foi.

Meus agradecimentos se estendem à República Sinta a Liga, que foi meu lar nos meus 5 anos de graduação, onde eu formei minha família de coração. Falam que nós aprendemos muito na faculdade, mas o que aprendi sobre a vida com vocês mudou completamente quem eu sou hoje. Estamos longe, mas sempre estarão no meu coração, em especial a Ariane, Beatriz, Renata, Ana Flávia e Nicolli. Ao meu grupo de mapeamento, Pedro, Henrique e Murilo, agradeço pelas risadas durante as campanhas e por todas as aventuras, incluindo o atropelamento do nosso mapa na avenida, ele sobreviveu no fim, igual a gente. Também agradeço aos amigos de longa data, e os amigos que Rio Claro me levou a conhecer.

Aos meus pais, Débora e César, obrigada por terem me apoiado quando eu disse que queria cursar geologia mesmo achando que era loucura, e por tornarem tudo isso possível. No fim, compartilho da mesma opinião, mas não faria diferente. Aos meus padrinhos, agradeço todas as conversas e risadas sobre a vida, vocês tornam tudo mais leve.

Ao meu parceiro de vida, João, por ter aturado as longas conversas geológicas mesmo sem entender nada, por oferecer o ombro quando precisei chorar nos momentos mais difíceis, e pelos abraços nas comemorações. Você é meu lar.

Ao pessoal da Meteoric que me recebeu tão bem e me ensinou tanto no período que passei com vocês. À Thaís e ao Caíque, que foram rostos conhecidos quando cheguei de paraquedas e não mediram esforços com os três estagiários que foram se aventurar em Minas Gerais. Agradeço ao Vinicius, Caio, Júlia e Eduardo, por todos os passeios turísticos e bate-papos à toa que tivemos (e também os não-tão-à-toa). Desejei que esses meses de estágio fossem mais longos com todos vocês.

Agradeço à ADIMB (Agência para o Desenvolvimento e Inovação do Setor Mineral Brasileiro) e Meteoric Resources, que fazem parte do Projeto Caldeira e financiaram a pesquisa para a realização deste trabalho, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela Chamada CNPq/MCTI Nº 10/2023 405350/2023-6 (Rejeitos da Mineração de Elementos de Terras Raras no Maciço de Poços de Caldas: estudos de aplicação e economia circular).

“Se você se sentir incomodado por algo misterioso ou por um problema que parece difícil de resolver, há um lugar que você pode ir, onde sempre encontrará ajuda. Você só precisa procurar.”

O Reino dos Gatos

RESUMO

No atual cenário mundial de transição para fontes energéticas mais limpas, os Elementos Terras Raras (ETR) se tornaram metais importantes no desenvolvimento de tecnologias e produção de equipamentos de baixa emissão de CO₂. Nesse cenário, o Brasil é apontado como um futuro fornecedor global importante de metais do grupo dos ETR, dado seu potencial para a presença de depósitos supergênicos de ETR, nos quais os metais estão adsorvidos nas argilas iônicas do perfil de alteração (*Ion Adsorption-type REE deposits*). Depósitos desse tipo apresentam teores relativamente mais baixos do que os depósitos em rocha sã, contudo seu processo de extração é mais simples e mais barato, o que o torna economicamente interessante, além de ser a principal fonte de elementos terras raras pesados, utilizados na produção de ímãs e baterias. Dentre as maiores reservas do país, estão os depósitos supergênicos associados ao Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC), em Minas Gerais, foco de estudos deste trabalho. O CAPC conta com uma caldeira (~78 Ma) de estrutura circular, caracterizada principalmente por rochas sieníticas, e por um perfil regolítico que pode chegar a mais de 100 m de espessura em locais, onde os corpos de minério com teores econômicos de ETR podem ocorrer. Contudo, pouco se conhece sobre a geologia destes depósitos do sistema Caldeira, principalmente acerca dos fatores que controlam a formação do depósito. Acredita-se que um dos principais fatores de controle seja a mineralogia dos regolitos, pois os minerais presentes neles determinam a capacidade de adsorção de ETR⁺, resultando em concentrações econômicas desses metais. Desta forma, o presente trabalho teve o objetivo de investigar a mineralogia do perfil regolítico em dois depósitos do Sistema Caldeira (Capão do Mel e Soberbo). Para esse estudo foram selecionadas amostras de furos de sondagem rotativa diamantados para análise de difração de raios-X e correlação com a geoquímica. A interpretação dos difratogramas forneceu a composição mineralógica ao longo de cada furo analisado e uma correlação geral entre os furos e alvos. Os dados mostram que a mineralogia geral se mantém constante nos furos analisados, apresentando diferenças principalmente relacionadas ao tipo de argilomineral presente. A predominância de argilas expansivas/interestratificadas sugerem influência hidrotermal, enquanto a presença de halloysita parece mais relacionada à alteração intempérica.

Palavras-chave: ETR; Complexo Alcalino de Poços de Caldas; Argila Iônica; Perfil Regolítico

ABSTRACT

In the current global context of transitioning to cleaner energy sources, Rare Earth Elements (REEs) have become critical metals for the development of technologies and the production of low CO₂ emission equipment. In this scenario, Brazil is seen as a key future global supplier of REE metals, given its potential for supergene REE deposits, where the metals are adsorbed in the ionic clays of the weathering profile (Ion Adsorption-type REE deposits). Although these deposits have relatively lower grades compared to primary rock deposits, their extraction process is simpler and more cost-effective, making them economically attractive. Additionally, they are the primary source of heavy rare earth elements, which are used in the production of magnets and batteries. Among the largest reserves in the country are the supergene deposits associated with the Poços de Caldas Alkaline Complex (PCAC) in Minas Gerais, which is the focus of this study. The PCAC features a circular (~78 Ma) caldera primarily composed of syenitic rocks, and a weathering profile that can exceed 100 meters in thickness in some areas, where ore bodies with economic concentrations of REEs may occur. However, little is known about the geology of these deposits within the caldera system, particularly regarding the factors that control their formation. It is believed that one of the main controlling factors is the mineralogy of the weathering profile, as the minerals present determine the adsorption capacity of REE ions, leading to economic concentrations of these metals. The aim of this study was to investigate the mineralogy of the weathering profile in two deposits within the Caldera System (Capão do Mel and Soberbo). For this, diamond-drilled core samples from rotary drilling were selected for X-ray diffraction analysis and correlation with geochemistry. The interpretation of the diffractograms provided the mineralogical composition along each analysed core and a general correlation between cores and targets. The data show that the overall mineralogy remains consistent across the analysed cores, with differences mainly related to the type of clay mineral present. The predominance of expansive/interstratified clays suggests a hydrothermal influence, while the presence of halloysite appears more related to weathering processes.

Keywords: REE; Poços de Caldas Alkaline Complex; Ionic Clay; Regolith Profile

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: <i>Ilustração esquemática do depósito do tipo argila iônica.</i>	21
Figura 2: Localização das áreas com Alvarás da Meteoric Resources, incluindo a área de estudos do presente estudo em Capão do Mel e Soberbo	25
Figura 3: Mapa de localização da área de estudos, incluindo as principais cidades e rodovias para o acesso à área.	26
Figura 4: : Esquema simplificado do sistema da Nappe Guaxupé-Socorro.....	27
Figura 5: Mapa simplificado mostrando a distribuição de intrusões alcalinas no Brasil com foco no LCF.	28
Figura 6: Mapa geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas - MG.	29
Figura 7: Descrição litológica e mineralógica do furo de sondagem SR-5 do Morro do Ferro, Poços de Caldas, de acordo com o IPT (1982).	33
Figura 8: Mapa de localização do alvo Soberbo incluindo os furos da sonda diamantada.....	34
Figura 9: Mapa de localização do alvo Capão do Mel, incluindo os furos da sonda diamantada.....	35
Figura 10: Processo de moagem das alíquotas no LPA-SG. (A) Equipamento: moinho almofariz pistilo MA590; (B) Amostra pré-moagem; (C) Amostra pós-moagem; (D): Amostra preparada para análise de totais no DRX; (E) Alíquota ao lado da amostra no porta amostras.	37
Figura 11: Processo de preparação de amostras de finos.(A) Decantação com auxílio da proveta graduada; (B) Equipamento: Centrífuga; (C): Interior da centrífuga com tubos de ensaio; (D) Tubo de ensaio da centrífuga com a fração de finos concentrada; (E) Amostra da	38
Figura 12: Equipamento para análise de difração de raios-x. (A) Parte externa do D2 PHASER; (B) Parte interna do D2 PHASER.	40
Figura 13: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0007. Profundidade: 0,00m-39,44m.....	42
Figura 14: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0008. Profundidade: 0,00m-40,58m.....	42
Figura 15: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0009. Profundidade: 0,00m-29,51m.....	42
Figura 16: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0010. Profundidade: 0,00m-57,75m.....	43

Figura 17: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0011. Profundidade: 0,00m-25,95m.....	43
Figura 18: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo SBDD001. Profundidade: 0,00m-18,15m.	44
Figura 19: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo SBDD0007. Profundidade: 0,00m-11,14m.	45
Figura 20: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo SBDD0010. Profundidade: 0,00m-38,69m.	45
Figura 21: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo SBDD0011. Profundidade: 0,00m-28,85m.	46
Figura 22: Exemplo de um difratograma de análise total do furo CDMDD0011_06-05, com a mineralogia indicada como exemplo das análises realizadas.	47
Figura 23: Exemplo do tratamento de amostras de finos usando o software DIFFRAC.SUITE EVA do furo CDMDD0011_06-05. O gráfico em preto representa a análise de finos, em vermelho, a análise da amostra glicolada e em azul, a análise da amostra queimada.....	47
Figura 24: Difratograma de análise total do furo SBDD0007_8.00-8.81, com a mineralogia indicada como exemplo das análises realizadas.	48
Figura 25: Difratogramas sobrepostos de análise de finos do furo SBDD0007_8.00-8.81. O gráfico em preto representa a análise de finos, em vermelho, a análise da amostra glicolada e em azul, a análise da amostra queimada.	49
Figura 26: Triângulo Textural Simplificado utilizado na classificação textural das amostras.....	50
Figura 27: Gráfico de coluna agrupada relacionando os minerais comumente encontrados pela difração com as texturas presentes no perfil regolítico na região do Capão do Mel.....	51
Figura 28: Gráfico de coluna agrupada relacionando os minerais comumente encontrados pela difração com as texturas presentes no perfil regolítico na região do Soberbo.....	52
Figura 29: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0007 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela Meteoric Resources, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.	57

Figura 30: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0008 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela <i>Meteoric Resources</i> , com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.	58
Figura 31: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0009 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela <i>Meteoric Resources</i> , com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.	59
Figura 32: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0010 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela <i>Meteoric Resources</i> , com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.	60
Figura 33: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0011 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela <i>Meteoric Resources</i> , com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.	61
Figura 34: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo SBDD0001 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela <i>Meteoric Resources</i> , com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.	64
Figura 35: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo SBDD0007 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela <i>Meteoric Resources</i> , com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.	65
Figura 36: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo SBDD0010 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela <i>Meteoric Resources</i> , com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e	

com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.66

Figura 37: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo SBDD0011 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela *Meteoric Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Teores de ETR leves e pesados nos intervalos amostrados e analisados com o DRX, em conjunto com as texturas do perfil regolítico e a mineralogia geral nos alvos do Capão do Mel e Soberbo	53
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

CAPC	Complexo Alcalino de Poços de Caldas
ETR	Elementos Terras Raras
ETRP	Elementos Terras Raras Pesados
ETRL	Elementos Terras Raras Leves
PMSM	Província Magmática da Serra do Mar
DRX	Difração de Raios X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
LCF	Lineamento de Cabo Frio
NSG	Nappe Socorro-Guaxupé
CSF	Cráton São Francisco
IREE	<i>Ion adsorption Rare Earth Elements</i>
REE	<i>Rare Earth Elements</i>
TREO	<i>Total Rare Earth Oxide</i>
TLREE	<i>Total Light Rare Earth</i>
THREE	<i>Total Heavy Rare Earth</i>
MREO	<i>Magnetic Rare Earth Oxides</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Objetivos e Justificativas.....	23
1.2. Localização e acesso à área de estudo	25
2. GEOLOGIA REGIONAL	26
2.1. Nappe Socorro-Guaxupé	26
2.2. Magmatismo alcalino Cretácico	27
2.3. Complexo Alcalino de Poços de Caldas	29
2.4. Evolução da paisagem e características do perfil regolítico do Complexo	30
3. DEPÓSITOS DE ELEMENTOS TERRAS RARAS DO SISTEMA CALDEIRA	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1. Levantamento bibliográfico	35
4.2. Seleção e coleta de amostras	36
4.3. Preparação das amostras para as análises de Difração de raios X	36
4.4. Análise mineralógica por Difração de raios X (DRX)	38
4.6. Correlação da mineralogia com teores de ETR.....	41
5. RESULTADOS	41
5.1. Descrição geral dos furos de sondagem.....	41
5.1.1. Capão do Mel.....	41
5.1.2. Soberbo	44
5.2. Variação da mineralogia do regolito ao longo dos furos	46
5.2.1. Capão do Mel.....	46
5.2.2. Soberbo	48
5.3. Variação da mineralogia nos diferentes tipos de textura do regolito.....	49
5.4. Variações da mineralogia do regolito entre os depósitos	52
5.5. Geoquímica dos ETRs ao longo do perfil	53
5.5.1. Capão do mel	53
5.5.2. Soberbo	62

6.	DISCUSSÃO	68
6.1.	Evolução do regolito	68
6.2.	Teor e mineralogia ao longo do perfil regolítico	69
7.	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os Elementos Terras Raras (ETR) são metais estratégicos na produção de novas tecnologias energéticas e, portanto, são essenciais ao movimento global em busca pela redução na emissão de CO₂, como resposta aos problemas climáticos atuais (Jowitt *et al.*, 2021). Esse movimento de busca por tecnologias associadas a fontes de energias renováveis e menos poluentes tem resultado no aumento da demanda mundial por metais estratégicos associados à transição energética, dentre eles os elementos terras raras (ETR).

As fontes naturais de ETR incluem: (a) depósitos de ETR associados a complexos alcalino-carbonatíticos onde os metais são produzidos a partir da concentração de minerais ricos em ETR extraídos e beneficiados da rocha sã e; (b) depósitos supergênicos de elementos terras raras em que os metais estão adsorvidos em argilas iônicas do perfil de intemperismo (*Ion Adsorption-type REE deposits*) (Zhenxiao *et al.*, 2023). Apesar de terem teores consideravelmente mais baixos do que os depósitos em rocha sã, o processo de extração nesse tipo de depósito é bem mais simples e barato, o que o torna mais interessante e viável economicamente (Zhenxiao *et al.*, 2023). Prova disso é que, atualmente, a exploração de depósitos desse tipo responde por cerca de 90% da produção mundial de ETR pesados. Vale ressaltar, entretanto, que a grande maioria dessa produção se concentra no sul da China (Zhenxiao *et al.*, 2023; Robb, 2013) com exemplares notáveis na Rússia, Índia e Austrália (Zhenxiao *et al.*, 2023; Wilson, 2004). Apenas na China, as reservas contabilizam 44 Mt, que corresponde a cerca de 36,7% das reservas totais globais (Zhenxiao *et al.*, 2023). No sul da China, as principais províncias de ETR são Jiangxi, Guangdong, Guangxi, Hunan, Fujian, Zheijiang e Yunnan, originadas de processos intempéricos sobre granitos e outras rochas vulcânicas. Outros depósitos de ETR do tipo argila iônica são encontrados no Laos, Tailândia, Filipinas e Madagascar (Sanematsu *et al.*, 2013; Padrones *et al.*, 2017; Zhenxiao *et al.*, 2023).

Segundo a literatura, (e.g., Sanematsu & Watanabe, 2016; Zhenxiao *et al.*, 2023) depósitos supergênicos de ETR normalmente se desenvolvem nas porções inferiores do perfil regolítico (horizonte C) de rochas ígneas félsicas (normalmente biotita-muscovita granitos altamente diferenciados, metaluminosos a levemente peraluminosos) e que foram submetidas ao intemperismo químico em climas tropicais com temperaturas e taxas de precipitação moderadas a altas (Sanematsu & Watanabe, 2016).

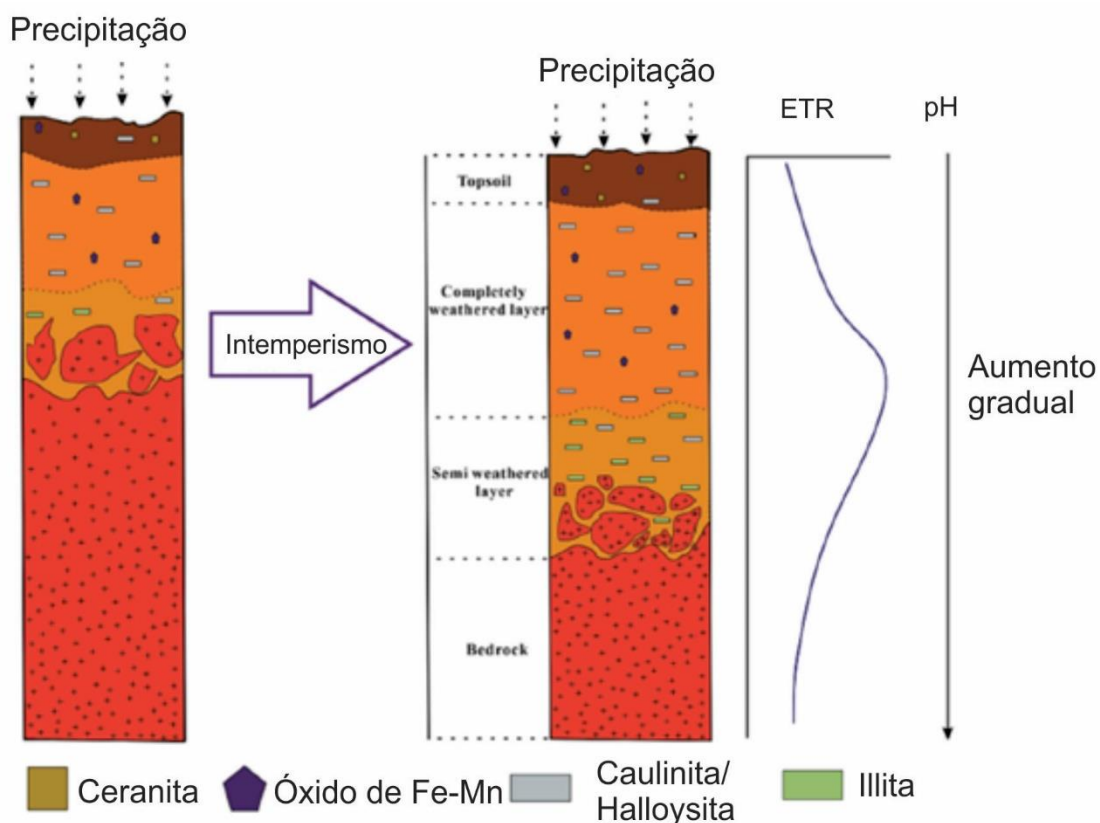
O intemperismo químico é dividido em três principais processos (e.g., Robb, 2013): (i) dissolução do material rochoso e o transporte/remoção dos íons e moléculas solúveis por

soluções aquosas; (ii) produção de novos minerais através da interação com os fluidos, como argilas, óxidos, hidróxido e carbonatos; (iii) acumulação de material residual inalterado em razão de baixa solubilidade, como o caso da Si e Al, por exemplo. Esses processos agem na formação de partículas finas de argila através da troca catiônica, o que fomenta progressivamente a quebra de minerais na zona de intemperismo (Robb, 2013).

Devido a ação do intemperismo químico, minerais portadores de ETR da rocha parental são destruídos, liberando íons de ETR que são transportados em solução aquosa na forma de: (i) complexos húmicos; (ii) íons de carbonato/bicarbonato ou; (iii) como íons de ETR^{3+} em solução, que são transportados para as porções inferiores do perfil regolítico, onde, ao encontrar pH maior, resultado da interação do fluido/rocha, são adsorvidos nas argilas (Sanematsu & Watanabe, 2016). .

Conforme a profundidade aumenta, o pH do ambiente aumenta também (Zhenxiao *et al.*, 2023), permitindo a adsorção gradual dos ETRs pelos argilominerais que, por fim, leva à formação dos depósitos do tipo argila iônica, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Ilustração esquemática do depósito do tipo argila iônica.



Fonte: Retirado de Zhenxiao et al., 2023; Huang et al., 2021c.

O processo de lixiviação em ETR ocorre de forma que as terras raras são substituídas por outros cátions, e a concentração de ETR é controlada pela disponibilidade de minerais ricos nesses metais (Zhenxiao *et al.*, 2023). Além desses fatores, há também a influência de micro-organismos (comunidades microbiais) no fracionamento e concentração dos elementos terras raras no perfil regolítico desses depósitos, especialmente na concentração de elementos terras raras pesados (ETRP) (e.g., Li *et al.*, 2022).

Trabalhos recentes de exploração no Complexo Alcalino de Poços de Caldas resultaram na descoberta de grandes depósitos supergênicos de ETR, hospedados no perfil regolítico desenvolvido sobre as rochas do Complexo Alcalino (*Meteoric Resources*). Os recursos são de 740 Mt @ 2,572 ppm TREO com cut-off de 1000 ppm (*Meteoric Resources*, 2024). A descoberta desses depósitos está entre as maiores descobertas de ETR do país (e.g., Bouças, 2023) e coloca o Brasil na terceira posição em termos de reservas mundiais de ETR. Em termos globais, um depósito economicamente relevante semelhante ao do CAPC no Brasil é o depósito de Madagascar, que também se origina de um complexo alcalino chamado Ambohimirahavavy (Estrade *et al.*, 2019).

O CAPC compreende uma estrutura circular com cerca de 800 Km² de área (Guarino *et al.*, 2021) (Figura 2). É o maior complexo alcalino do Brasil e o segundo maior do mundo. Está geologicamente localizado no extremo oeste do Lineamento Magmático de Cabo Frio (e.g., Ulbrich *et al.*, 2005; Ferroni *et al.*, 2018), uma estrutura WNW-ESE localizada a norte da província da Serra do Mar que, segundo Almeida (1991), se estende de Poços de Caldas a Cabo Frio e que é interpretada como uma zona de fratura que teria permitido a ascensão do magma alcalino, através de pelo menos 2 fases de reativação (Riccomini *et al.*, 2005). O CAPC apresenta idade aproximada de 78 Ma e é composto por rochas sieníticas (Thompson *et al.*, 1998), majoritariamente, fonólitos peralcalinos (Guarino *et al.*, 2021).

O complexo está intrudido em gnaisses, migmatitos e granulitos da Nappe Socorro-Guaxupé (e.g., Campo Neto & Caby, 1999; Salazar *et al.*, 2014) que constituem o embasamento orogênico neoproterozoico. A atividade vulcânica se iniciou com a formação de um domo nas camadas rochosas superiores e foi seguida pelo encaixe de rochas vulcânicas e por subsidência (Guarino *et al.*, 2021; Ellert, 1959).

O relevo do complexo é peculiar, caracterizado por um platô de altitude média de 1300 metros, bordejado por diques anelares que se originaram da ascensão do magma na periferia do maciço, sendo estabelecido em uma chaminé de rochas vulcânicas alcalinas (Gouvea *et al.*, 2014). Ellert *et al.* (1959) tratam o planalto com duas áreas geomorfológicas distintas em relação à drenagem: a primeira apresenta drenagens anelares e a outra, radiais.

A região possui um longo histórico de mineração com lavra de bauxita e urânio (mina Osamu-Utsumi, atualmente desativada) (Lima, 2012), além da extração de argila para produção de refratários. Ressalta-se o papel do intemperismo como importante agente mineralizador na formação dos diversos tipos de depósitos presentes na área. Além disso, infiltrações hidrotermais de fluidos ricos em potássio e flúor, sin- a tardi-magmáticos, provocaram alterações nas rochas originais, gerando enriquecimento em argilominerais, urânio, tório, molibdênio, fluorita e ETRs (Guarino *et al.*, 2021). Conforme rochas foram sofrendo a ação do intemperismo, a presença desses materiais permitiu a formação de solos residuais lateríticos/bauxíticos que têm sido explorados em algumas áreas do CAPC, como o Morro do Ferro (Guarino *et al.*, 2021). Adicionalmente, de forma localizada, a literatura reporta que o brechamento de algumas rochas facilitou a infiltração de água no solo (Garda, 1990), fazendo com que o estágio final de enriquecimento do depósito fosse extremamente relacionado a processos intempéricos superficiais que, por sua vez, são intrinsecamente ligados à pedogênese

que originou o regolito na região (material inconsolidado presente no topo da rocha preservada e inalterada) (Garda, 1990; Robb, 2013).

Contudo, apesar do longo histórico de mineração da região, as grandes descobertas de depósitos supergênicos de ETR é relativamente recente, e resulta do crescimento da demanda mundial por esses metais, o que despertou o interesse de empresas em investir na exploração de ocorrências previamente conhecidas na região (e.g., Gouvea *et al.*, 2014; Guarino *et al.*, 2021; Sanematsu & Watanabe, 2016; Zhenxiao *et al.*, 2023).

Embora os trabalhos de exploração sejam recentes, a ocorrência de concentrações econômicas de ETR já era conhecida, de tal forma que trabalhos anteriores mencionam a presença de mineralizações de ETR do tipo argila iônica com teores variando entre 140 e 6500 ppm, com uma média típica de 800 ppm (Sanematsu & Watanabe, 2016) e, segundo Andrade (2014), o teor e recursos presentes em Poços de Caldas poderiam alcançar 1,15% e 3 Mt de minério lavrável respectivamente.

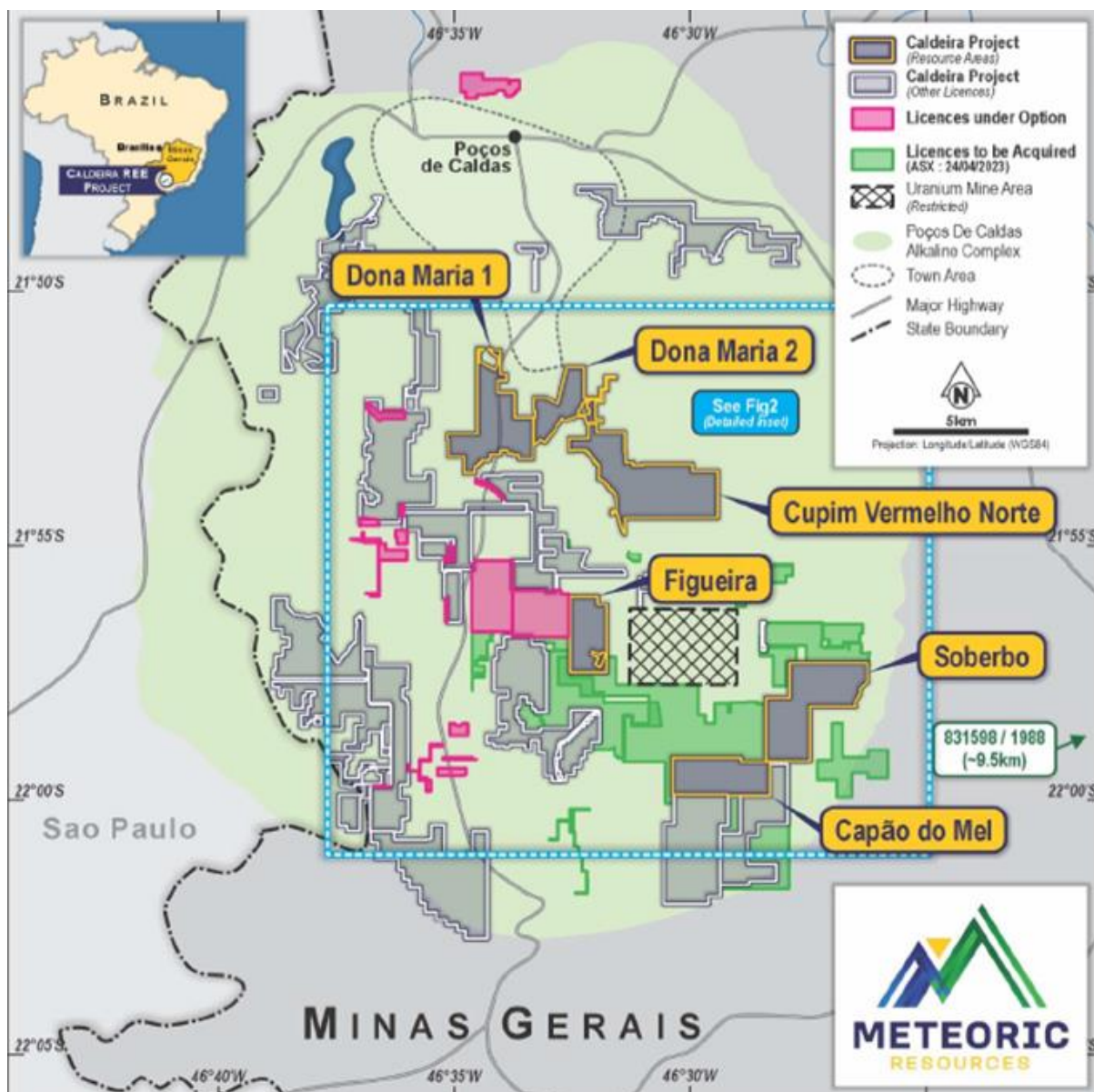
Os depósitos supergênicos de ETR localizados no Complexo Alcalino de Poços de Caldas diferem da maioria dos depósitos supergênicos de ETR conhecidos. Apesar de terem sido informalmente considerados do tipo argila iônica (IREE), sua gênese está associada ao desenvolvimento de regolitos sobre rochas magmáticas alcalinas de natureza agpaítica (e.g., Guarino *et al.*, 2021), diferindo dos grandes depósitos de Argila Iônica do sul da China. Além disso, o teor médio (2.626 ppm) é muito maior quando comparado com outros depósitos desse tipo no mundo, cujos teores médios são tipicamente ~800ppm (e.g., Sanematsu e Watanabe, 2016), fato que por si só, já o difere da maioria dos depósitos conhecidos mundialmente. Soma-se a isso o relevo do CAPC, marcado por uma grande estrutura circular mais elevada na borda e por coberturas de solo que podem ter mais de 100 m de espessura, tratando-se de um caso atípico de depósitos supergênicos de ETR.

1.1. Objetivos e Justificativas

Por se tratar de uma descoberta recente ainda há muito pouca informação sobre a geologia desses depósitos, incluindo os controles primários e secundários da mineralização. Acredita-se que um dos principais controles da mineralização esteja relacionado com a mineralogia do perfil regolítico, incluindo o tipo e variedade dos minerais presentes. Dessa forma, neste trabalho foi feita uma caracterização da mineralogia do perfil regolítico em dois dos depósitos da área (Soberbo e Capão do Mel) (Figura 3). A caracterização foi feita utilizando

difração de raios-x de intervalos de amostras de furos de sondagem diamantada. Os resultados foram analisados em conjunto com dados geoquímicos de teor, fornecidos pela empresa dona dos alvarás de pesquisa da área (*Meteoric Resources*), o que permitiu a correlação entre os minerais do perfil regolítico com os teores de elementos de terras raras.

Figura 2: Localização das áreas com Alvarás da Meteoric Resources, incluindo a área de estudos do presente estudo em Capão do Mel e Soberbo



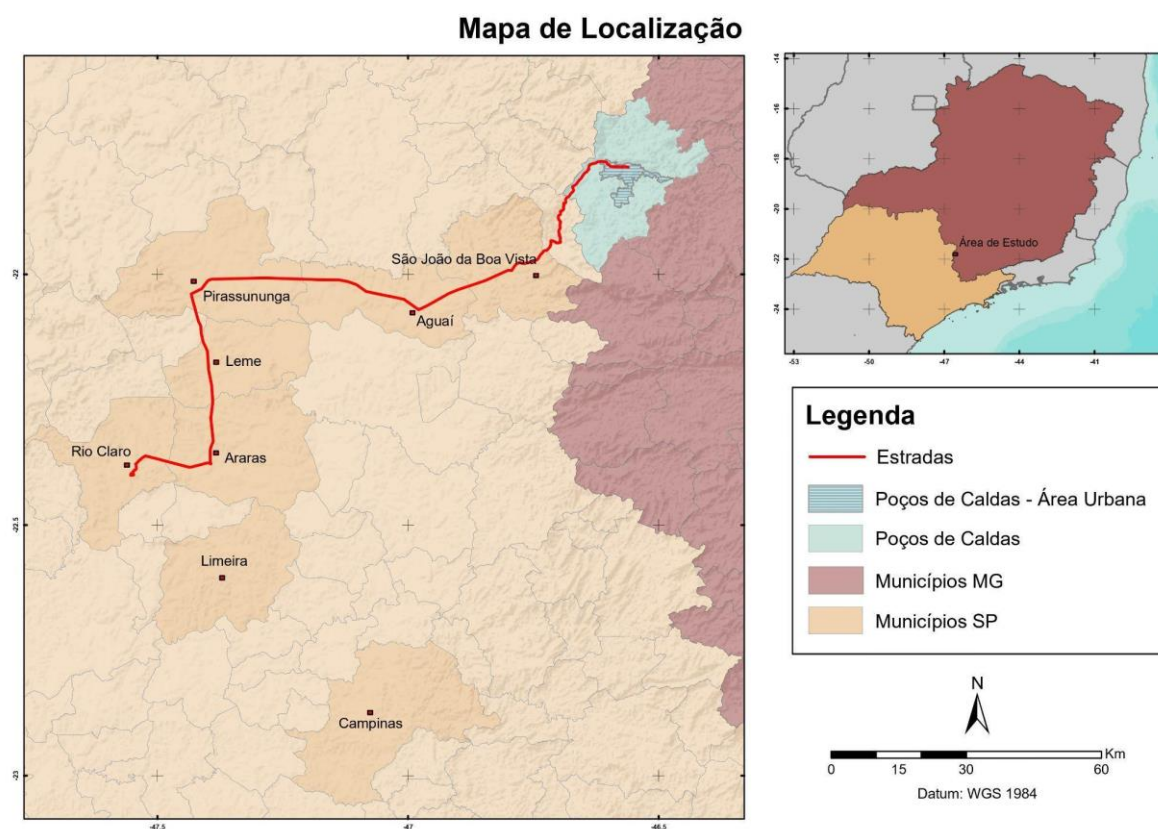
Fonte: Retirado de *Meteoric Resources*, 2023

1.2. Localização e acesso à área de estudo

A área de estudo está localizada no sudeste do CAPC, há cerca de 160 km de Rio Claro (Figura 4). Compreende os depósitos Capão do Mel e Soberbo (Figura 2). As áreas apresentam 12.3 km², sendo que Soberbo é o maior com 7.7 km² e Capão do Mel com 4.6 km².

Partindo de Rio Claro o acesso à área pode ser feito pelas rodovias: SP 191 até Araras; SP-050 até Pirassununga; SP-225 até Aguaí; SP-344 até São João da Boa Vista; SP 342 e BR 267 até o município de Poços de Caldas e, por fim; segue-se pela BR 146 sentido Andradás por aproximadamente 28 km.

Figura 3: Mapa de localização da área de estudos, incluindo as principais cidades e rodovias para o acesso à área.



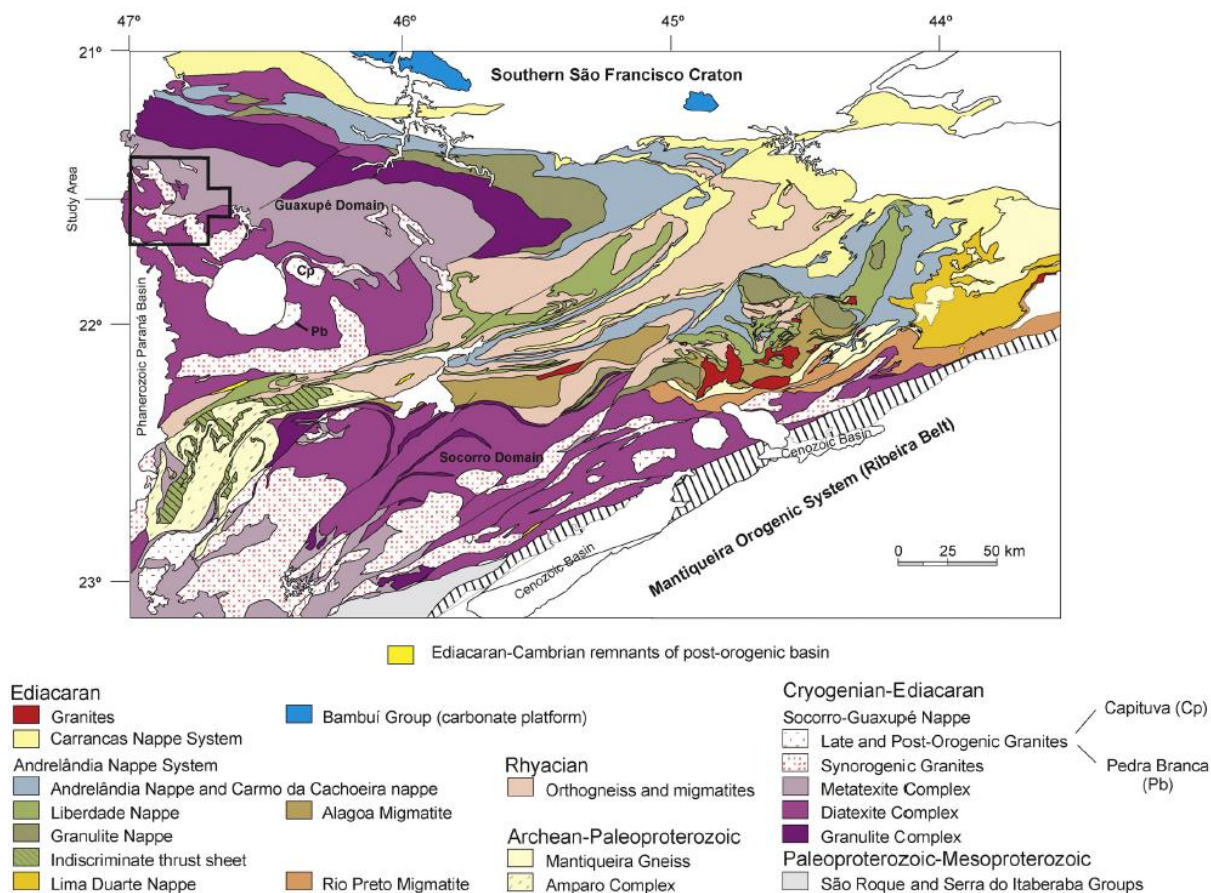
2. GEOLOGIA REGIONAL

2.1. *Nappe Socorro-Guaxupé*

A NSG é interpretada por alguns autores como um espesso segmento de rochas de fácies granulito parcialmente fundidas, oriundas de porções da crosta continental intermediária a inferior (e.g., Mora *et al.*, 2014; Campo Neto & Caby, 2000; Campos Neto *et al.*, 2011) e que representa as raízes de um antigo arco magmático pré-colisional (e.g., Mora *et al.*, 2014; Melo & Oliveira, 2013; Campo & Caby, 2000; Campos Neto *et al.*, 2011). A NSG foi anexada à porção sul da Faixa Brasília durante o Neoproterozóico, tendo sido transportada de oeste para leste empurrada sobre rochas do Cráton São Francisco (Figura 5). As rochas da NSG registram idades de ~625 Ma para o pico metamórfico (e.g., Mora *et al.*, 2014). O segmento norte da Nappe Socorro Guaxupé, onde o CAPC está intrudido, denominado Complexo Guaxupé (e.g., Melo & Oliveira, 2013), é subdividido em 3 grandes unidades: (1) Unidade granulítica basal onde ocorrem granulitos bandados; (2) Unidade diatexitica intermediária, composta por granito, granodiorito, monzogranito, sienogranito e sienitos; (3) Unidade Metatexitica superior,

composta por gnaisses migmatíticos com estruturas bem preservadas e rochas metassedimentares (e.g., Campos Neto *et al.*, 2011).

Figura 4: Esquema simplificado do sistema da Nappe Guaxupé-Socorro.



Fonte: Retirado de Mora *et al.*, 2014, adaptado de Campos Neto *et al.*, 2011.

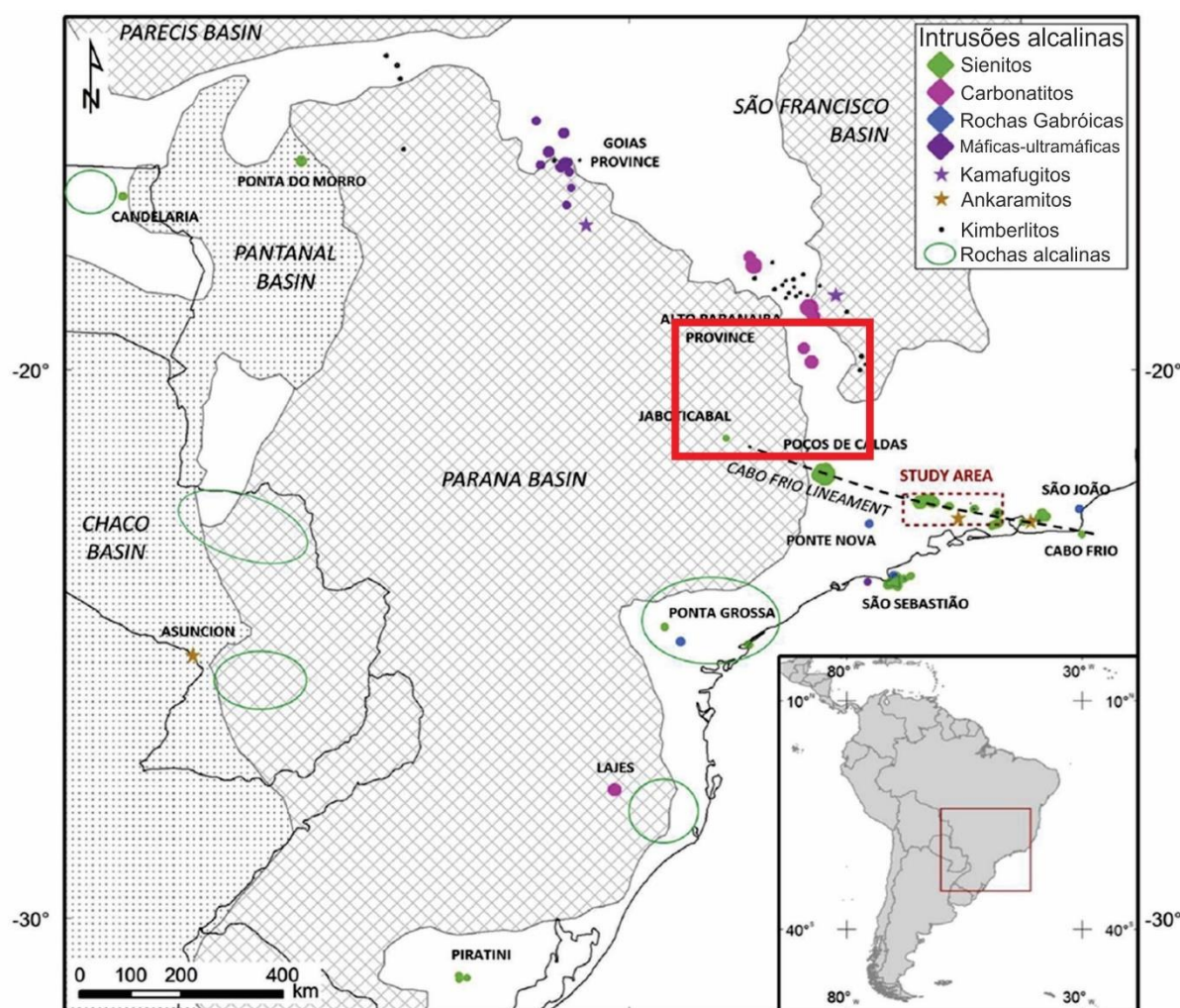
Além das principais unidades supracitadas, a NSG também apresenta suítes magmáticas mangeríticas, sin-orogênicas cálcio-alcálicas (Mora *et al.*, 2014; Janasi 2002; Melo & Oliveira, 2013). e é estruturalmente relacionada a duas unidades tectonoestratigráficas pré-cambrianas: o Cinturão Alto Rio Grande, representado principalmente por rochas supracrustais dobradas, e pela base retrabalhada do Cráton São Francisco (CSF) (Campos Neto e Caby, 1999; Ulbrich *et al.*, 2005). Ademais, apresenta foliações sub-horizontais com lineações de trend ENE, que são consideradas possíveis evidências do sentido do cisalhamento e deslocamento do sistema para leste do CSF (Campos Neto e Caby, 2000).

2.2. Magmatismo alcalino Cretácico

O magmatismo anorogênico é caracterizado por pequenos volumes de magma com associações alcalinas (Ferroni *et al.*, 2018), formando províncias que, segundo Bailey e Woolley (2005), ocorrem no topo de estruturas profundas pré-existentes (Ferroni *et al.*, 2018).

No Brasil, existem diversas províncias alcalinas, principalmente no sul da margem continental brasileira, na qual as províncias são fortemente relacionadas ao magmatismo do Serra Geral (e.g. Gomes *et al.*, 2013; Ferroni *et al.*, 2018). Já à norte da província da Serra do Mar, Almeida (1991) definiu o Lineamento de Cabo Frio (LCF) como uma série de intrusões sieníticas que seguem o trend WNW-ESSE em conjunto com uma série de diques alcalinos na região de Poços de Caldas até Cabo Frio (Figura 6), e é interpretado por Riccomini *et al.* (2005) como uma zona de fratura que teria permitido a ascensão do magma alcalino, através de pelo menos 2 fases de

Figura 5: Mapa simplificado mostrando a distribuição de intrusões alcalinas no Brasil com foco no LCF. reativação.



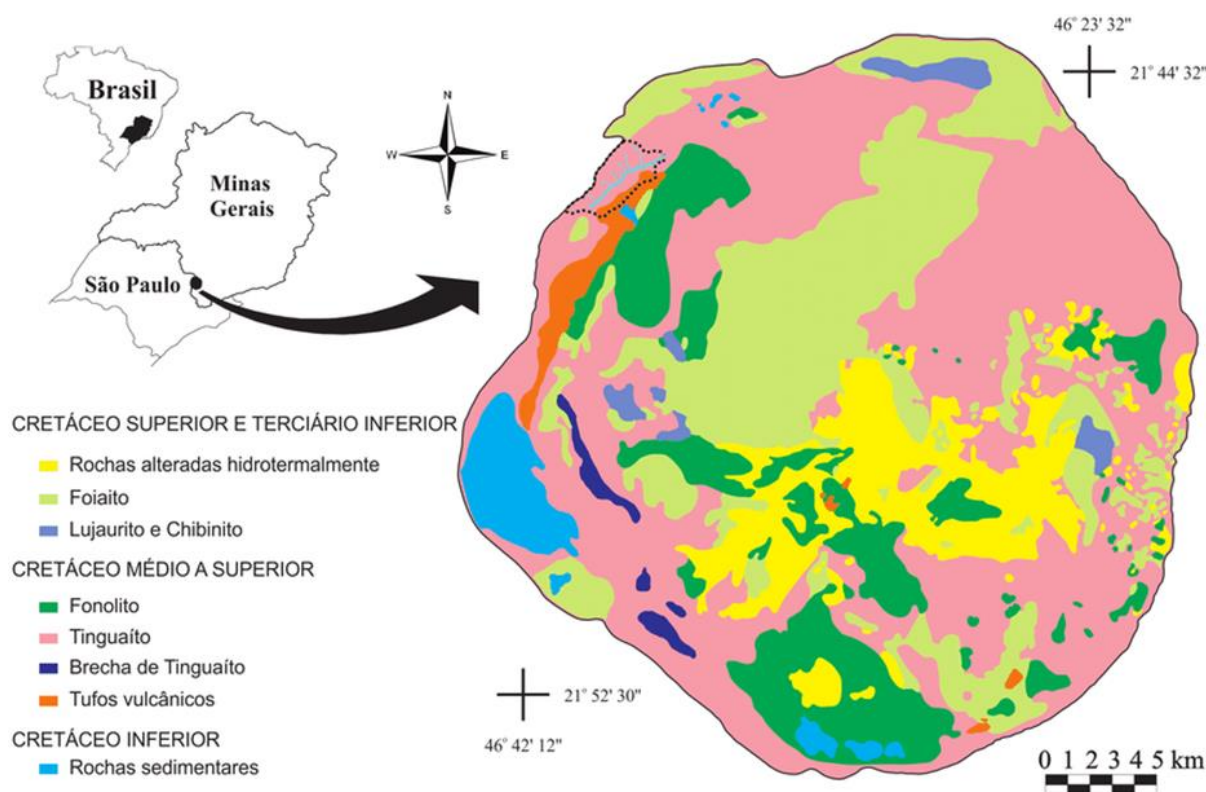
Fonte: Retirado e adaptado de Ferroni *et al.*, 2018.

As províncias alcalinas brasileiras, incluindo o LCF, apresentam uma intrínseca relação com as estruturas crustais, pois as intrusões são controladas, alinhadas ou alongadas de acordo com as zonas de fraturas no embasamento cristalino (Almeida, 1983; Riccomini *et al.*, 2005).

2.3. Complexo Alcalino de Poços de Caldas

Neste contexto, o Complexo Alcalino de Poços de Caldas (CAPC) está localizado no extremo oeste do LCF (Ellert, 1959; Ulbrich, 1984; Ulbrich, 2000; Ferroni *et al.*, 2018), intrudido no segmento norte da NGS, no limite entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais. Ele apresenta uma configuração de estrutura circular típica de caldeira, com mais de 800 km² de área (Guarino *et al.*, 2021). Com idade aproximada de 78 Ma (Cretáceo superior), é considerado o maior complexo alcalino do Brasil e o segundo maior do mundo (e.g. Guarino *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2023).

Figura 6: Mapa geológico do Complexo Alcalino de Poços de Caldas - MG.



Fonte: Retirado de Sardinha *et al.*, 2018, adaptado de Ellert (1959); Ulbrich (1984); INB (2011).

Os litotipos presentes no CAPC incluem, segundo Ulbrich *et al.* (2005) e Guarino *et al.* (2021): (1) rochas intrusivas e efusivas intermediárias que incluem nefelina sienitos, fonólitos, foiaito e tinguaitos; (2) rochas básicas a ultrabásicas, como foiditos e basaltos alcalinos (e.g., Guarino *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2023), geralmente com aspecto brechado e, raramente, na forma de diques; (3) rochas máficas a ultramáficas, que se apresentam na forma de materiais vulcanoclásticos.

A atividade vulcânica que levou à formação do CAPC iniciou com o levantamento de blocos do embasamento cristalino, provocando o domeamento das camadas superiores,

provavelmente escalonado por falhas presentes no embasamento cristalino, e foi seguida por atividades vulcânicas que originaram brechas, tufos e derrames de lavas alcalinas (e.g., Ellert, 1959; Guarino *et al.* 2021). Na porção sul do maciço, ocorreu também uma segunda fase da atividade, mas com lava foiaítica. Essas atividades foram seguidas pela subsidência da porção central da caldeira (Ellert, 1959). Após o colapso, ocorreu a ascensão do magma nefelinítico nas bordas do maciço, através de fendas circulares e radiais, seguida da formação do dique anelar, formado principalmente por tinguaitos (Ellert, 1959).

Nas fases tardias da evolução da Caldeira, o brechamento em algumas porções facilitou a infiltração e circulação de fluidos, permitindo rápido resfriamento e circulação de fluidos ricos em potássio e flúor (Garda, 1990). A ocorrência dessas infiltrações levou à alteração das assembleias magmáticas originais, provocando o enriquecimento de argilominerais, urânio, tório, molibdênio, fluorita e ETRs (Guarino *et al.*, 2021).

No caso dos depósitos de ETRs, foco do presente trabalho, os argilominerais são produtos de intemperismo relativamente mais intenso e ocorrem tanto *in situ*, quanto como podem ser transportados, mas também podem ser produtos de alterações hidrotermais de baixa temperatura.

Com a ação contínua do intemperismo sob o maciço, a presença dos materiais citados anteriormente levou à formação de solos residuais lateríticos/bauxíticos, além dos depósitos de terras raras, que será mais detalhado adiante.

Como resultado desses processos, o relevo do CAPC é marcado por um platô de altitude média de 1300 m, bordejado pelos diques anelares, sendo estabelecido em uma chaminé de rochas alcalinas (Gouvea, 2014). O planalto é dividido em duas áreas geomorfológicas distintas, baseando-se nas drenagens como critério: a primeira área é a maior e apresenta drenagens anelares, enquanto a outra é menor e radial, com relevo entre juventude e maturidade (Ellert, 1959).

2.4. *Evolução da paisagem e características do perfil regolítico do Complexo*

A região do CAPC está inserida na província geomorfológica Planalto Sul de Minas (Sardinha *et al.*, 2018), que é subdividida em 3 unidades: (i) Superfície do Alto Rio Grande, (ii) Planalto São Pedro de Caldas, (iii) Planalto de Caldas (CPRM, 1979). Além da divisão geomorfológica, as características de relevo variam de acordo com diferentes regiões do Complexo. Segundo Sardinha *et al.* (2018) a área do dique anelar é composta por montanhas

com topos restritos e domínio de tálus nas encostas, enquanto sua porção noroeste apresenta relevos mais acidentados e conta com solos rasos, cambissolos com sequência de horizontes A, Bi e C (Sardinha *et al.*, 2018). Já a região interna do CAPC apresenta morros e montes de topos arredondados, colinas, planícies aluviais e rampas de colúvio perto de rios (Sardinha *et al.*, 2018).

Neste contexto geomorfológico, alguns autores (e.g., Bonotto *et al.*, 2007; Sardinha *et al.* 2018) realizaram estudos para quantificar a evolução do perfil regolítico do Complexo, levando em conta o contexto geológico do CAPC.

Bonotto *et al.* (2007) estimaram a taxas de intemperismo da ordem de 0,015 mm/ano, ou 67.000 anos para o intemperismo de 1m de rocha nas condições climáticas atuais, na região do Morro do Ferro, na porção central do complexo. Os autores utilizaram o modelamento de isótopos de Urânio baseado na taxa de atividade do U^{234}/U^{238} em amostras de rocha, solo e água subterrânea ($^{234}U/^{238}U$ AR).

Baseado em estudos de hidrogeoquímicos, Sardinha *et al.* (2018) estimou taxas de intemperismo químico da ordem de 0,0036 mm/ano ou 278.000 anos para o intemperismo vertical de 1 metro de rocha nas condições climáticas atuais, na região da Bacia do Córrego da Ariranha, NW do Maciço. Os mesmos autores estimam taxa de denudação de ~0,005 mm/ano, ou 200.000 anos para retirar 1 metro de solo. Segundo os autores a taxa de intemperismo e de remoção de solos apresentam entre si uma relação que leva ao balanço de equilíbrio de denudação, de forma que se o valor da remoção de solo supera a taxa de intemperismo, ocorreria um balanço positivo de denudação (Penteado, 1974), que é o que ocorre nesse caso, segundo os resultados apresentados por Sardinha *et al.* (2018).

Segundo Rodrigues (1984) a maior parte dos solos da região do Maciço Alcalino de Poços de Caldas podem ser classificados nas classes dos Latossolos Brunos e Vermelhos Amarelos. Segundo o autor, são solos argilosos a muito argilosos, ácidos, argila de baixa atividade e álicos, com estrutura no horizonte B latossólico em grau moderado e fraco. Com relação à cor, estrutura e composição, segundo Rodrigues (1984), predomina coloração brunada nos matizes 10YR a 5YR; estrutura pequena a grande em forma de bloco subangular em grau moderado e; mineralogia 1:1 com influência de materiais amorfos, mica e matéria orgânica, no complexo coloidal. Segundo o autor a composição mineralógica é predominantemente caulinita, gibbsita, materiais amorfos (alofanas) e mica, com pequenas percentagens de vermiculita com hidroxila interlamelar, quartzo, óxidos de titânio e feldspatos.

Descrições do perfil regolítico da região do Morro do Ferro feitas a partir de furos de sondagem (IPT, 1982) mostram que a porção superior do perfil é inicialmente classificado como limonita em matriz siltosa passando para silte argiloso com fragmentos de limonita (até ~4 m). Abaixo disso predominam solos do tipo *silt clay* que se intercalam com diques de magnetita/limonita de menor espessura (1 a 2m) (Fig. 7). A mineralogia reportada nos intervalos silte argiloso e *silt clay* é principalmente illita/sericita, caulinita, gibbsita, goethita e limonita (Figura 7), mineralogia similar ao que é reportada por Rodrigues (1984). Em alguns intervalos do furo é reportado a presença de fluorcarbonatos de Ce e ETR (bastnasita), óxidos e fosfatos de Ce e Th (cerianita e cheralita) e silicato de tório (torita). Ressalta-se que a região do Morro do Ferro possui uma geologia peculiar. A área hospeda um depósito supergênico de Th e ETR desenvolvido sobre rochas inicialmente carbonatíticas (Waber, 1992), motivo pelo qual há uma grande quantidade de minerais portadores de Ce, ETR e La.

Segundo o Rodrigues (1984) a gibbsita encontra-se em duas formas: gibbsita primária I nas frações areia e silte, formadas pela alteração direta de feldspatos e a gibbsita secundária II, formada pela dessilicatização da caulinita, enquanto a caulinita é originada da alteração direta do feldspato, ressilicatização de gibbsita I e dessilicatização da mica.

Figura 7: Descrição litológica e mineralógica do furo de sondagem SR-5 do Morro do Ferro, Poços de Caldas, de acordo com o IPT (1982).

Profundidade (m)	DESCRIÇÃO	PRINCIPAIS MINERAIS	NOTAS
	0		
	Limonita em matriz siltosa	Illita/sericita, caulinita, gibbsita, goethita, limonita, bastnasita, cerianita e torianita	Fragmentos de limonita de aproximadamente 5 cm de diâmetro, marrom escuro a preto
	Solto argilosa com fragmentos de limonita	Illita/sericita, caulinita, gibbsita, goethita, limonita, bastnasita e torita	Marrom escuro a marrom avermelhado
	Argila siltosa	Illita/sericita, caulinita, gibbsita, hematita, limonita, bastnasita e cheralita	Marrom avermelhado com fragmentos de limonita
			Branco amarelado
			Marrom escuro
			Amarelo esbranquiçado
	Dique de magnetita com presença de limonita	Magnetita e limonita	Coloração preta
	Argila siltosa	Illita/sericita, caulinita e cheralita	Amarelo esbranquiçado
	Dique de magnetita com presença de limonita	Magnetita e limonita	Coloração preta
	Argila siltosa com fragmentos de magnetita cobertos por limonita	Illita/sericita, gibbsita, caulinita, goethita e limonita	Amarelo esbranquiçado
	Dique de magnetita com vários fragmentos de 0,5 a 3 cm de diâmetro	Magnetita	Coloração preta
	Argila siltosa	Illita/sericita, caulinita, grupo da alunita, hematita e bastnasita	Marrom avermelhado
	Dique de magnetita com vários fragmentos de 0,2 a 2 cm de diâmetro	Magnetita	Coloração preta
	27		
	Argila siltosa	Illita/sericita, caulinita e bastnasita	Amarelo esbranquiçado

Fonte: Retirado e traduzido de Bonotto *et al.* (2007)

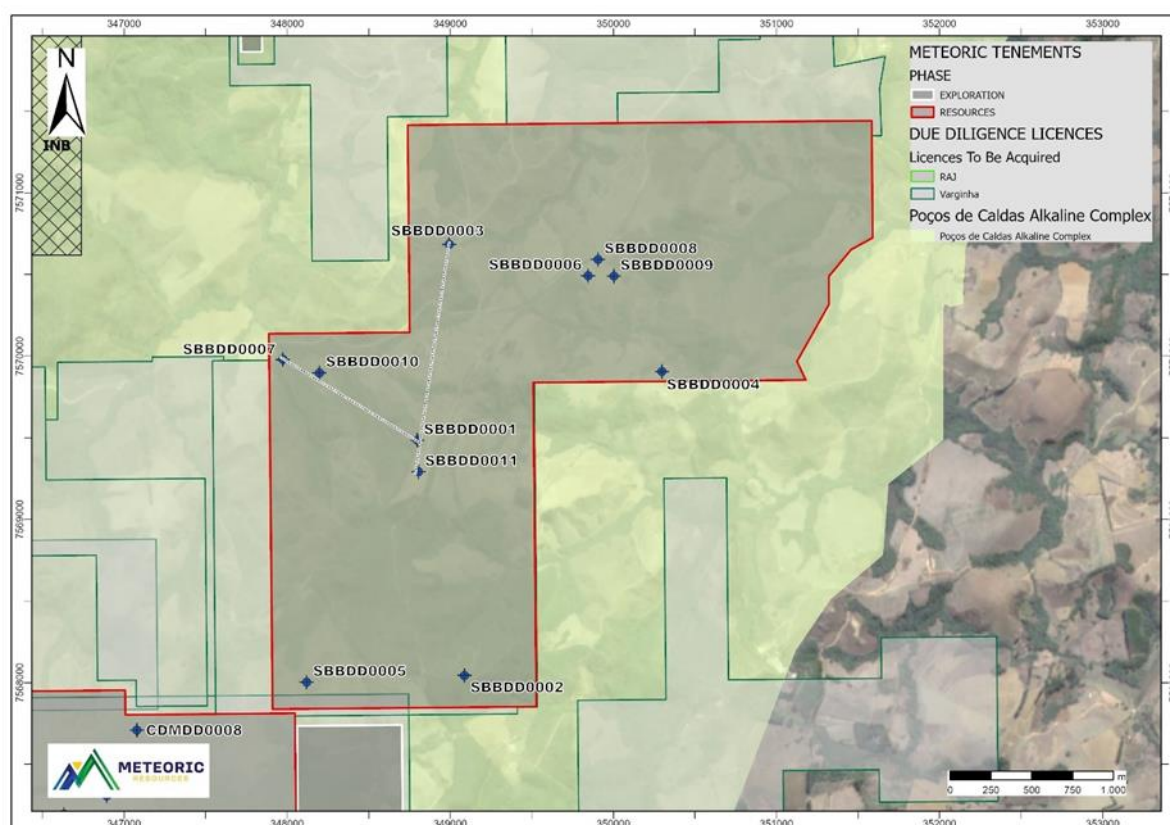
3. DEPÓSITOS DE ELEMENTOS TERRAS RARAS DO SISTEMA CALDEIRA

A região do Sistema Caldeira apresenta um longo histórico de mineração com lavras de bauxita e argilas para fabricação de refratários, sem interesse nas terras raras. Apesar de diversos autores (e.g., Ellert, 1959; Campos Neto & Caby, 2000) reconhecerem a presença de ETR nas rochas alcalinas do CAPC, não há estudos que descrevem o perfil regolítico e a relação entre mineralogia presente e a formação dos depósitos de ETR. Ao comparar os depósitos superficiais em relação aos teores em rochas, nota-se que teores de ETR são consideravelmente menores no primeiro caso, mas possibilitam uma extração bem mais simples (Sanematsu & Watanabe, 2016) e com menor custo, o que chamou a atenção para o sistema Caldeira, que apresenta ótimas reservas de ETR inseridas do perfil, espalhadas pela área. Inseridos nesse contexto, os alvos Soberbo e Capão do Mel são o foco do presente trabalho.

O projeto Caldeira apresenta recurso de 740 Mt @ 2,572 ppm TREO com *cut-off* de 1000 ppm (*Meteoric Resources*, 2024) para os alvarás sob titularidade da *Meteoric Resources*. Os trabalhos de exploração executados em três desses alvarás resultaram em um recurso indicado de 170 Mt @ 2.766 ppm TREO com *cut-off* de 1000 ppm.

O alvo de Soberbo (Figura 8) conta com uma área de 772,72 ha, e é considerado um dos maiores alvos de pesquisa do projeto. A *Meteoric Resources* apresentou um recurso indicado em 86 Mt @ 2730 ppm TREO com *cut-off* de 1000 ppm e razão de MREO/TREO de 24,5% (*Meteoric Resources*, 2024). Para a coleta e geração desses dados, a empresa realizou 11 furos com a sonda diamantada na área com recuperação dos testemunhos e, desses furos, foram coletadas amostras de 4 furos para realizar a caracterização mineralógica neste trabalho, sendo eles os furos de sigla: SBDD0001, SBDD0007, SBDD0010 e SBDD0011. Na área, a principal litologia encontrada consiste em fonólitos e sienitos.

Figura 8: Mapa de localização do alvo Soberbo incluindo os furos da sonda diamantada.



Fonte: Retirado de *Meteoric Resources*, 2023.

O depósito de Capão do Mel (Figura 9) abrange uma área de 457,27 ha e, segundo o anúncio da *Meteoric Resources* (2024), apresenta o recurso medido de 11 Mt @ 3.888 ppm TREO com *cut-off* de 1000 ppm e razão de MREO/TREO de 21,7% e recurso indicado de 74

e seções geológicas produzidas pela equipe de exploração da *Meteoric Resources*, foram disponibilizados e utilizados como suporte na seleção de amostras e na integração regional dos dados.

4.2. *Seleção e coleta de amostras*

A amostragem foi realizada em furos de sondagem diamantadas. Os furos estudados foram executados durante campanhas de sondagem realizadas pela *Meteoric Resources*. Os furos para amostragem foram escolhidos ao longo de seções nos depósitos estudados. Para isso foi separada uma seção NNE-SSW na porção central do Alvo Capão do Mel com seis furos de sondagem, e duas seções no Alvo Soberbo, uma NW-SE com 4 furos, e outra NNE-SSW com 3 furos. O critério de escolha das seções foi baseado na variabilidade de teor, buscando-se pegar furos em zonas de alto teor e furos em regiões de baixo teor.

As amostras foram coletadas em intervalos nos furos buscando-se, na maioria dos casos coletar amostras dos mesmos intervalos da amostragem geoquímica feita pela *Meteoric Resources*. No total foram amostrados 21 intervalos de 5 furos de sondagem do Depósito Capão do Mel e 4 furos de sondagem de 10 intervalos do Depósito Soberbo. Os intervalos selecionados para a coleta levaram em conta os teores de ETR e as diferenças visuais nos furos, incluindo coloração e textura.

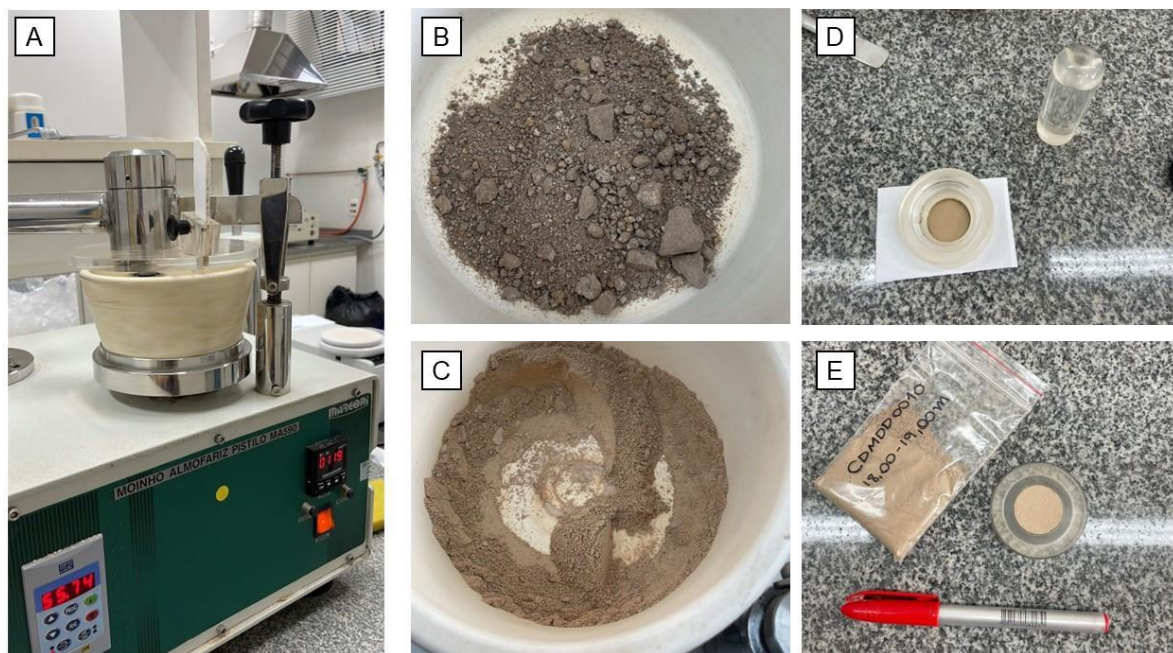
4.3. *Preparação das amostras para as análises de Difração de raios X*

Após a coleta das amostras, elas foram preparadas para análise. Inicialmente as amostras foram enviadas para um processo de preparação nos laboratórios da Unifal-MG, onde foram desagregadas em almofariz, manualmente, e depois cominuídas em moinho planetário marca Servitech, modelo M80, até granulometria passante na peneira ABNT #80. A cominuição foi realizada utilizando 90 rpm e, após esse processo, as amostras foram quarteadas pelo método da pilha, até a obtenção das alíquotas de aproximadamente 350 g que foram enviadas para os laboratórios de preparação de amostras sedimentológicas e geoquímicas (LPA-SG) da UNESPetro.

No Laboratório de Preparação de Amostras Sedimentológicas e Geoquímicas (LPA-SG), as amostras foram moídas no moinho almofariz pistilo MA590 a fim de garantir que a granulometria dos materiais esteja de acordo para a difratometria (Figura 10). Esse procedimento manual é importante para evitar orientações preferenciais dos minerais nas

amostras. Ao fim dessa primeira etapa, as amostras foram levadas ao difratômetro para a rotina de análise total.

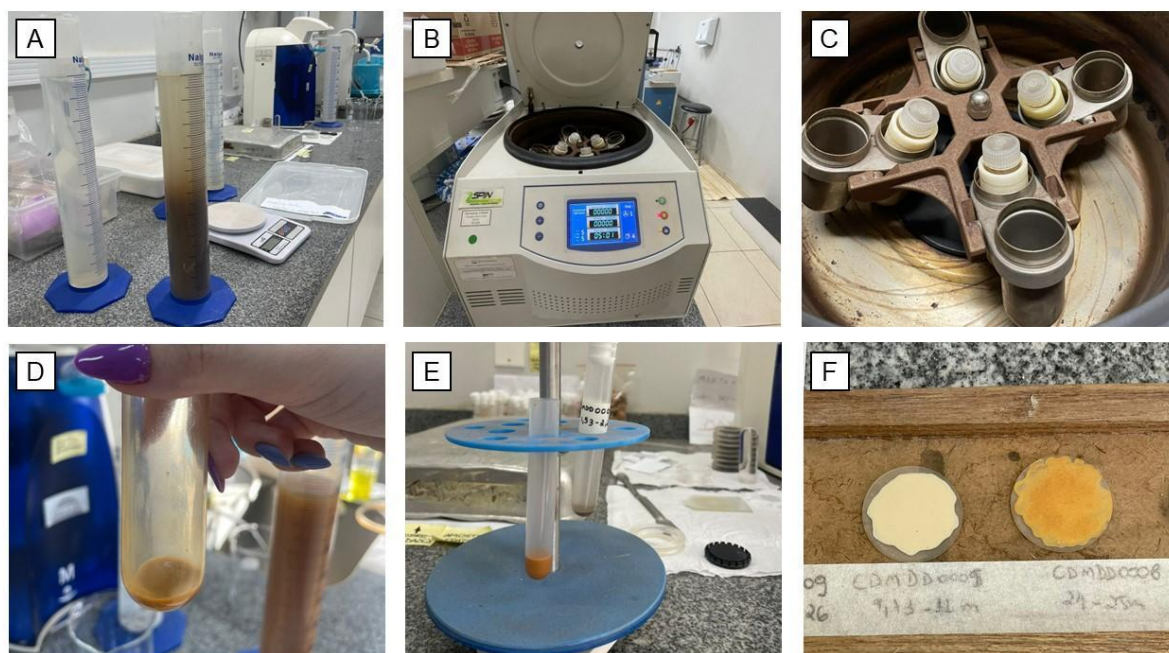
Figura 10: Processo de moagem das alíquotas no LPA-SG. (A) Equipamento: moinho almofariz pistilo MA590; (B) Amostra pré-moagem; (C) Amostra pós-moagem; (D): Amostra preparada para análise de totais no DRX; (E) Alíquota ao lado da amostra no porta amostras.



Fonte: Autora.

Após as análises da mineralogia total, as amostras onde identificou-se presença de argilominerais foram separadas e preparadas para a análise de fração fina, com o intuito de detalhar a determinação da mineralogia das argilas e verificar a existência de argilas expansivas. Para isso, foram utilizados os seguintes materiais: proveta graduada (1000 ml), Becker de vidro, bastão de plástico, pipeta, mangueira e tubos de ensaio. Uma porção da amostra foi coletada e dissolvida em 1000ml de água deionizada na proveta graduada, e misturada até que a fração mais fina ficasse suspensa na água. O material permaneceu em repouso por 3 a 5 minutos para garantir melhor separação da fração fina e, com o auxílio da mangueira, os 200ml superficiais foram transferidos para o becker de vidro. O becker foi agitado para que o material ficasse o mais homogêneo possível e dividido em 4 tubos de ensaio em partes idênticas, que foram levados para a centrífuga FANEM 2006 (*Spin Lab*) (Figura 11), para separar a fração fina da água deionizada. Ao final da centrifugação, o material concentrado foi transferido para outro tubo de ensaio e, com uma pipeta de plástico, uma pequena porção foi coletada e distribuída em um disco de vidro. A amostra foi levada para a estufa a 39^oC até secar completamente.

Figura 11: Processo de preparação de amostras de finos. (A) Decantação com auxílio da proveta graduada; (B) Equipamento: Centrífuga; (C): Interior da centrífuga com tubos de ensaio; (D) Tubo de ensaio da centrífuga com a fração de finos concentrada; (E) Amostra da



Fonte: Autora

Ao secar, as amostras retornam para o DRX para a segunda fase, como “amostra de fração fina” e, após essa análise, elas foram submetidas à solvatação no etilenoglicol para expandir as argilas, melhorando a identificação dos argilominerais. Com a identificação de “amostra de finos glicolada”, elas passam novamente pela rotina de finos no DRX. Por fim, foram submetidas à queima no forno, para remover a água que pode estar intercalada nos argilominerais, de forma que nos primeiros 20 minutos, a amostra é queimada a 200°C, e aumenta para 500°C nos 60 minutos subsequentes. O processo de queima auxilia na avaliação da estabilidade térmica dos argilominerais e também pode resultar na alteração de certos minerais, facilitando a identificação de fases que não são tão simples de detectar quando estão hidratadas. Ao fim da queima, as amostras são retiradas do forno e após o resfriamento, retornam para uma última análise de finos, como “amostra queimada”.

4.4. Análise mineralógica por Difração de raios X (DRX)

Análises de DRX foram executadas com o objetivo de identificar as principais fases minerais presentes no regolito, incluindo óxidos hidróxidos e argilominerais formados pelo intemperismo e minerais resistatos. A difração de raios X é o método mais indicado para a caracterização de argilominerais do regolito, por sua simplicidade e rapidez na aplicação, e também por sua capacidade de caracterizar as fases cristalinas, indicando não só os elementos

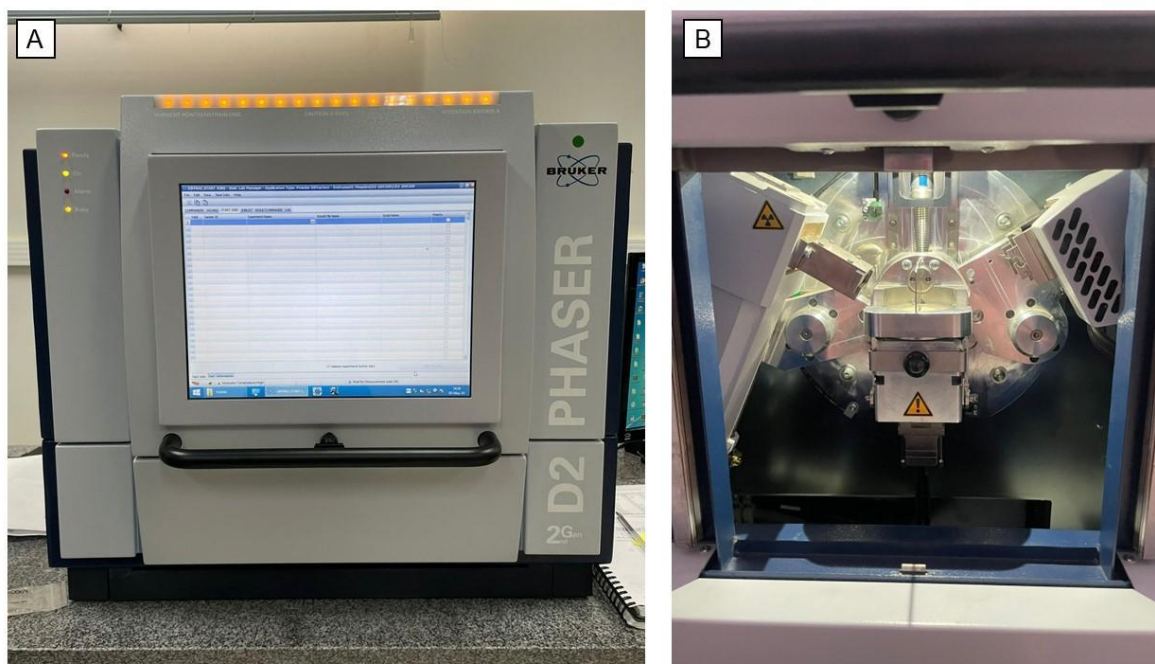
químicos presentes no material, como acontece na análise química, mas também a forma como estão arranjados (e.g. Albers et al., 2002; Gobbo, 2009). A técnica consiste na incidência de um feixe de raios-x em um cristal na amostra, que provoca o fenômeno da difração. O material analisado apresenta estrutura cristalina de forma que o fenômeno da difração ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg ($n\lambda = 2d \sin \theta$). A Lei de Bragg descreve o trajeto de um feixe monocromático com um determinado comprimento de onda (λ) incidente sobre um cristal a um ângulo (θ), chamado de ângulo de Bragg, que relaciona o ângulo da difração e a distância entre os planos de origem (e.g. Albers et al., 2002; Gobbo, 2009).

As análises de difração de raios X foram realizadas no Laboratório de radiações ionizantes (LARIN) da UNESPetro, na UNESP, campus de Rio Claro. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios X da marca Bruker modelo D2 PHASER (Figura 12) que usa radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.54184\text{\AA}$), operando com voltagem de 30 kV, corrente de 10 mA. O goniômetro rotaciona a uma velocidade de $15^\circ/\text{min}$ e passo igual a 0,02.

Essa etapa foi dividida em duas partes: a primeira, que consiste na análise de amostra total; e a segunda, que analisa a porção de materiais finos. Para a primeira parte (amostra total), o D2 Phaser opera com a faca de 1 mm e fenda primária de 0,6 mm, com varredura da faixa de análise de 4° a 90° em 2θ , e para a segunda fase (amostra finos), a faca utilizada é de 0,5 mm e a fenda primária é de 0,2 mm, com varredura de 2° a 28° em 2θ .

Na primeira etapa de análise no DRX, uma pequena porção da amostra é colocada no porta amostras em forma de disco e prensada até que a superfície da amostra esteja lisa e nivelada com o disco, a fim de garantir resultados mais precisos, de forma que os cristais não fiquem orientados.

Figura 12: Equipamento para análise de difração de raios-x. (A) Parte externa do D2 PHASER; (B) Parte interna do D2 PHASER.



Fonte: Autora.

4.5. Tratamento e Interpretação dos dados

Ao final do processo de análise para cada amostra foram gerados 4 difratogramas: (i) análise total, (ii) fração fina, (iii) etilenoglicol e; (iv) aquecida a 500°C. Os difratogramas foram analisados e interpretados através do *software* DIFFRAC.SUITE EVA (BRUKER), que compara as medições do DRX com bancos de dados para identificar os minerais presentes.

Nessa etapa, todos os gráficos de análise total foram interpretados de acordo com as intensidades de pico sem *background*, para facilitar a visualização, com o auxílio da base de dados “PDF-4/Minerals 2024”, disponibilizadas pelo ICDD Database (*Internacional Centre for Diffraction Data*). É importante ressaltar que, para cada difratograma de análise total que apresentou picos para argilominerais, foram utilizados os difratogramas de análise de fração fina para identificar com maior precisão possíveis argilas detectadas, interpretados com o auxílio da tabela “*Clay Mineral Identification Flow Diagram*” disponibilizadas pela USGS.

Os difratogramas de análise total foram interpretados segundo a base de dados mencionada. No entanto, os picos de alguns argilominerais não são suficientes para uma correlação precisa e, nestes casos, os difratogramas de finos (ii, iii e iv) foram utilizados para identificá-los, já que alguns argilominerais apresentam comportamentos de difração diferentes dependendo se estão hidratados (glicolados) ou desidratados (queimados). Para melhor

visualização, os gráficos dos finos (ii, iii e iv) foram sobrepostos em um único layout, para observar se ocorreram mudanças nos picos dos finos e, caso tenha ocorrido, como ocorreu essa mudança, se o pico foi deslocado ou colapsado, por exemplo.

4.6. *Correlação da mineralogia com teores de ETR*

A empresa *Meteoric Resources* disponibilizou a análise geoquímica dos furos de Soberbo: SBDD0001, SBDD0007, SBDD0010 e SBDD0011; e do Capão do Mel: CDMDD0007, CDMDD0008, CDMDD0009, CDMDD0010 e CDMDD0011, dos quais foram selecionados os dados geoquímicos dos ETR leves (ETRL) e pesados (ETRP) presentes ao longo desses furos para elaborar gráficos, para de entender como que os ETRs leves e pesados se relacionam com a mineralogia presente ao longo do perfil regolítico.

Esses gráficos foram dispostos ao lado dos esquemas dos perfis de cada furo amostrado, confeccionados e cedidos pela *Meteoric Resources*, em conjunto com o perfil de classificação textural do regolito. Na profundidade correspondente de cada amostra analisada pelo DRX, a mineralogia encontrada foi indicada e relacionada com os valores de ETR leves e pesados presentes e com a classificação textural. Além dos gráficos, foi feita uma tabela no *software* Excel (Microsoft Office), correlacionando os furos selecionados com os intervalos de amostras coletadas, a classificação textural do regolito, os valores geoquímicos totais de terras raras leves e pesados e os minerais encontrados através do DRX.

5. RESULTADOS

5.1. *Descrição geral dos furos de sondagem*

5.1.1. *Capão do Mel*

Os furos utilizados para a amostragem da área do Capão do Mel (Figuras 13, 14, 15, 16 e 17) foram descritos, no geral, com uma classificação textural do regolito mais arenosa, se comparada com os furos de Soberbo. Os furos nesse alvo são mais profundos, chegando a 57,75 metros de profundidade, e tiveram uma recuperação de 98,82% (*Meteoric Resources*).

Figura 13: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0007. Profundidade: 0,00m-39,44m.

CDMDD0007



Fonte: Disponibilizadas pela empresa *Meteoric Resources*.

Figura 14: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0008. Profundidade: 0,00m-40,58m.

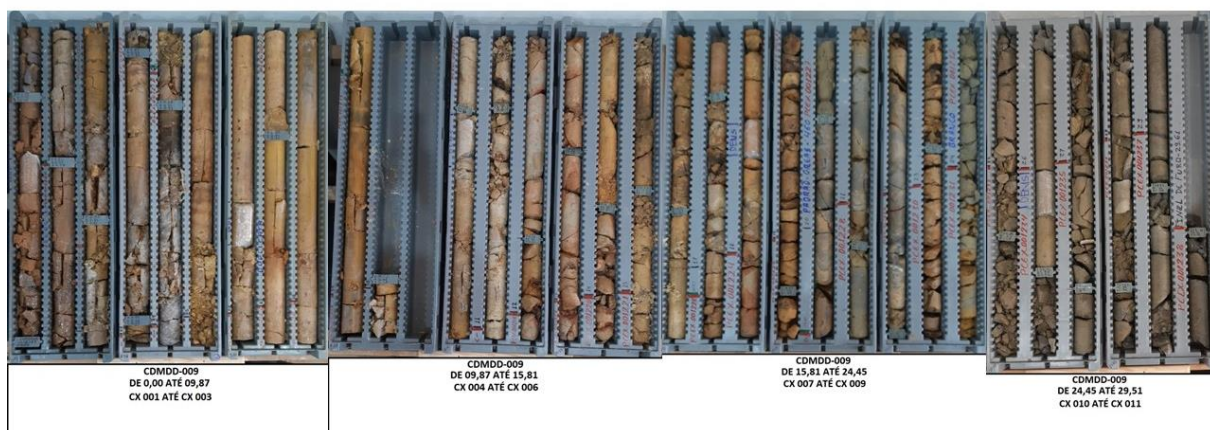
CDMDD0008



Fonte: Disponibilizadas pela empresa *Meteoric Resources*.

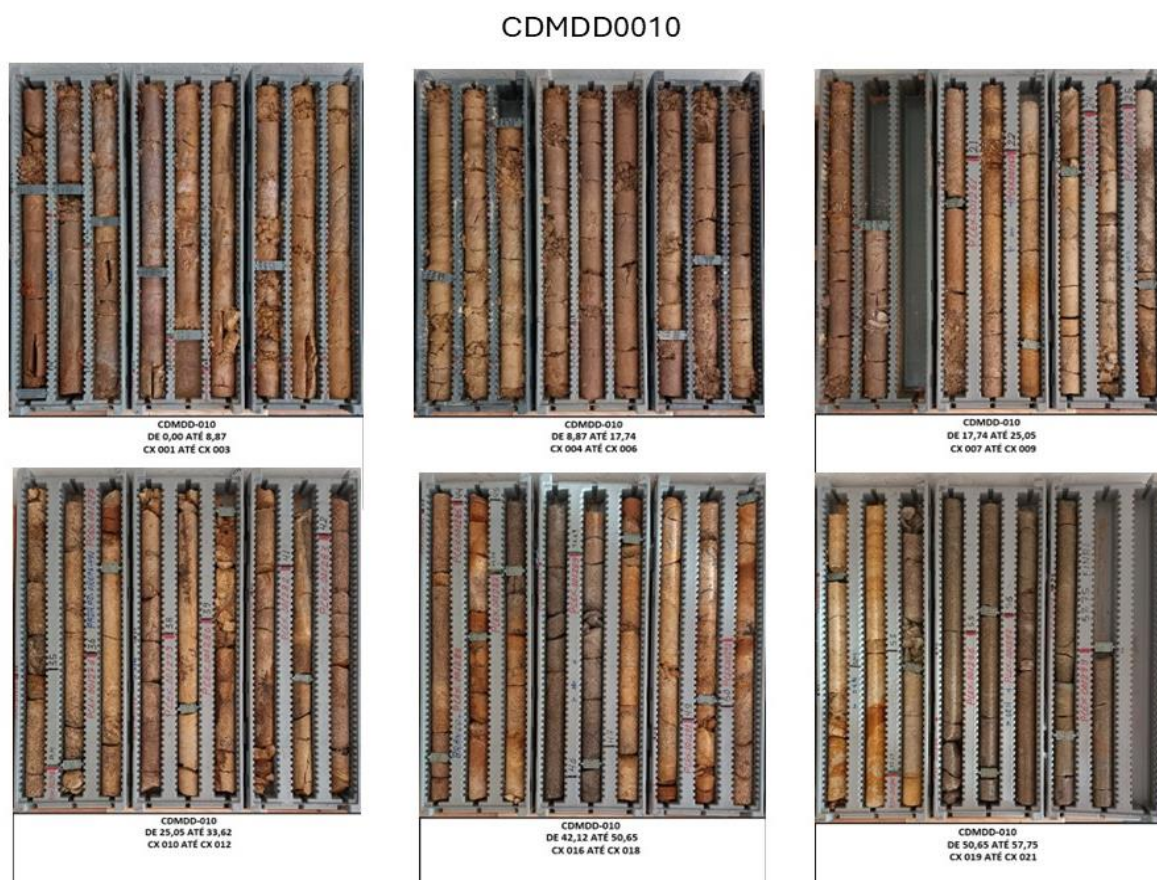
Figura 15: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0009. Profundidade: 0,00m-29,51m.

CDMDD0009



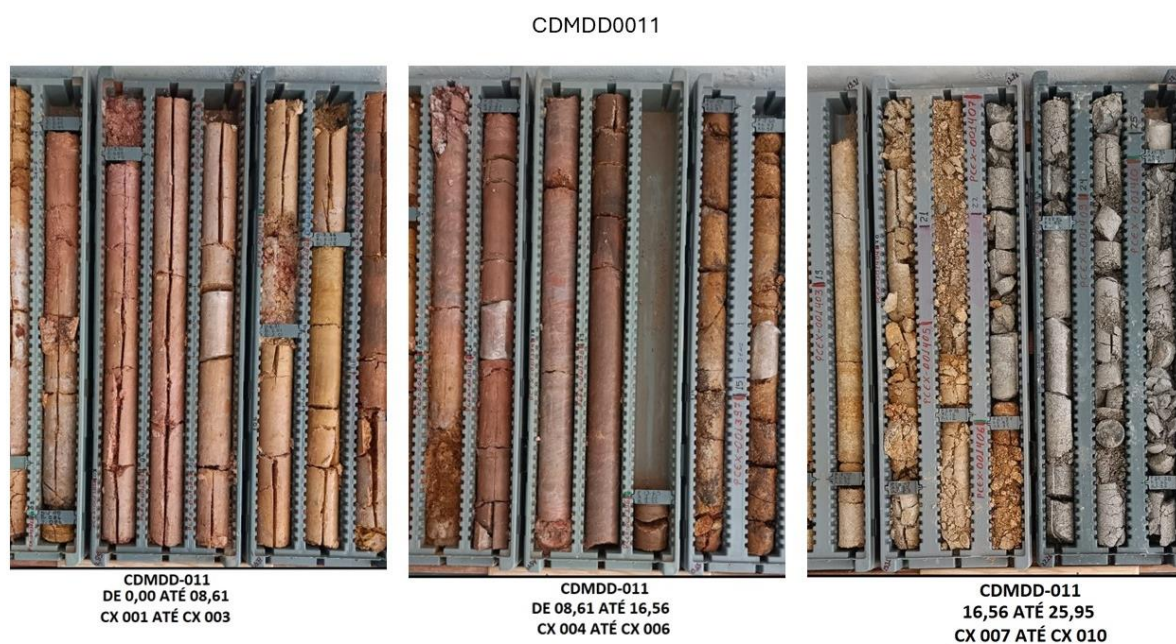
Fonte: Disponibilizadas pela empresa *Meteoric Resources*.

Figura 16: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0010. Profundidade: 0,00m-57,75m.



Fonte: Disponibilizadas pela empresa *Meteoric Resources*.

Figura 17: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo CDMDD0011. Profundidade: 0,00m-25,95m.

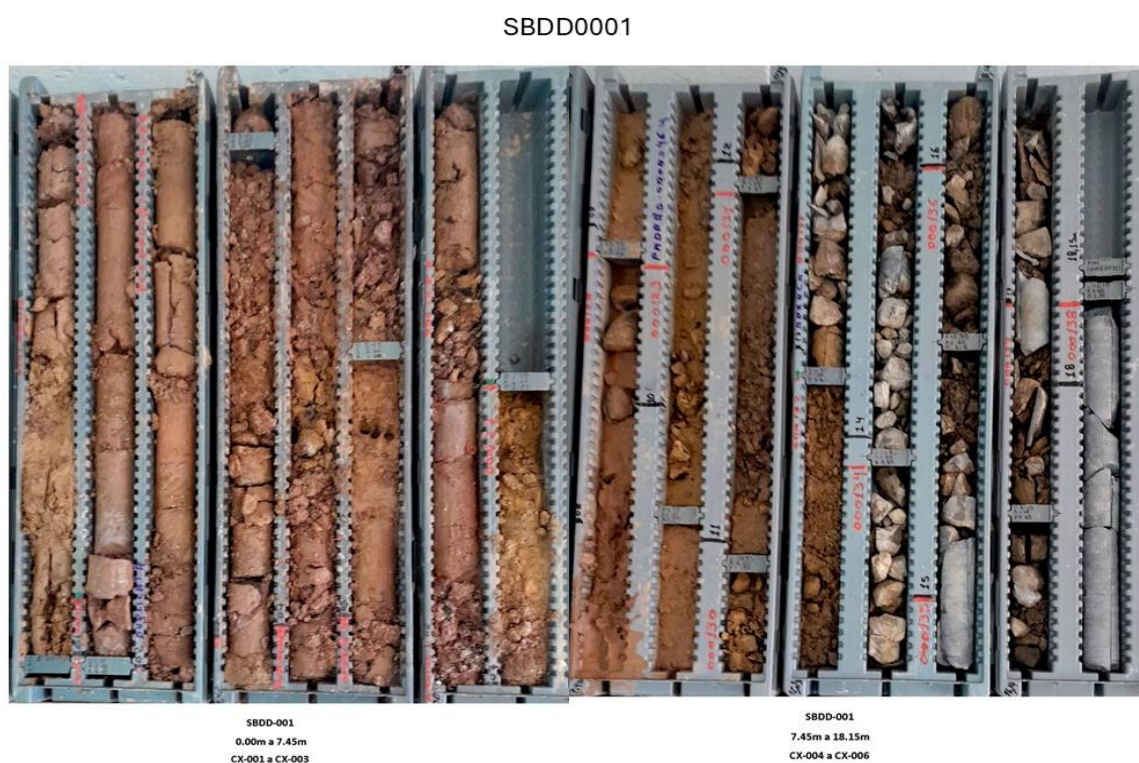


Fonte: Disponibilizadas pela empresa *Meteoric Resources*.

5.1.2. Soberbo

Os furos utilizados para a amostragem da área do Soberbo (Figuras 18, 19, 20 e 21) foram descritos, no geral, com uma classificação textural do regolito mais argilosa, se comparada com os furos do Capão do Mel. Os furos nesse alvo são menos profundos, chegando a 39 metros de profundidade, e tiveram uma média de recuperação de 92%.

Figura 18: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo SBDD001. Profundidade: 0,00m-18,15m.



Fonte: Disponibilizadas pela empresa Meteoric Resources.

Figura 19: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo SBDD0007. Profundidade: 0,00m-11,14m.

SBDD0007



Fonte: Disponibilizadas pela empresa Meteoric Resources.

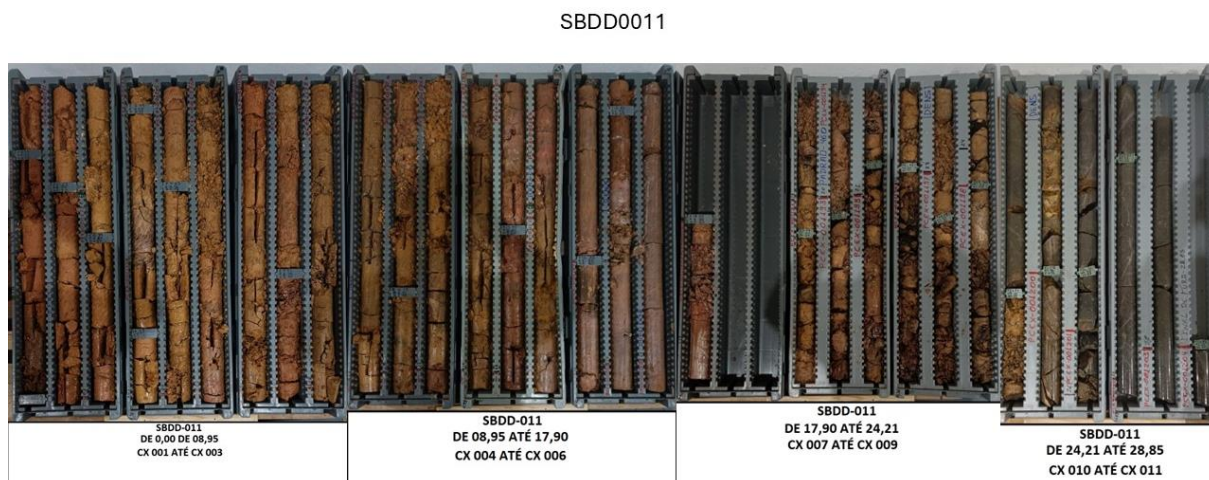
Figura 20: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo SBDD0010. Profundidade: 0,00m-38,69m.

SBDD0010



Fonte: Disponibilizadas pela empresa Meteoric Resources.

Figura 21: Fotografias do testemunho de sondagem diamantada do furo SBDD0011. Profundidade: 0,00m-28,85m.



Fonte: Disponibilizadas pela empresa Meteoric Resources.

5.2. Variação da mineralogia do regolito ao longo dos furos

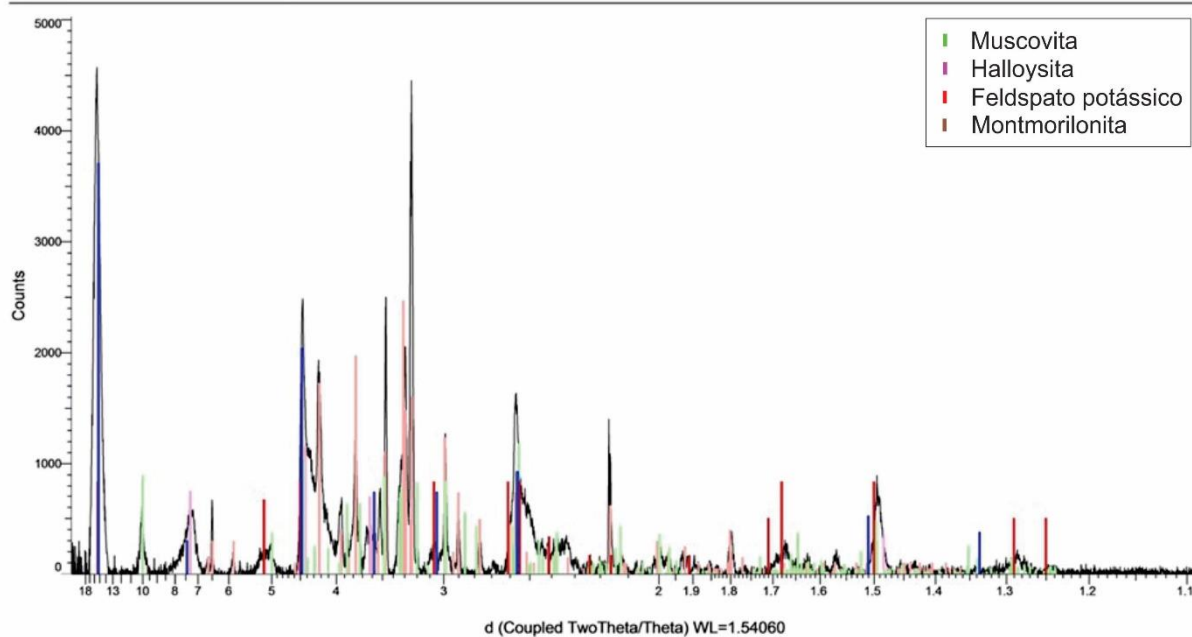
Os dados mostram que a mineralogia geral encontrada não apresenta muitas variações, sendo as principais mudanças notadas no tipo de argilomineral presente. Há intervalos com presença de halloysita em abundância, enquanto há amostras com predominância de minerais expansivos do grupo da esmectita, montmorilonita e possivelmente interestratificados, como a corrensita. As argilas com predominância de minerais expansivos e/ou interestratificados sugerem influência hidrotermal, enquanto a presença de halloysita pode estar mais relacionada à alteração intempérica.

5.2.1. Capão do Mel

Nos depósitos da área do Capão do Mel, a mineralogia geral encontrada através dos ensaios de DRX, foi o feldspato potássico, halloysita, muscovita, montmorilonita, illita, caulinita, albita, biotita, nacrita e analcima. As interpretações dos difratogramas de análise total (Figura 22) e análise de finos (Figura 23) foram realizadas pelo *software* DIFFRAC.SUITE EVA. É importante ressaltar que a mineralogia na região não se resume a apenas estes minerais, esses são os resultados obtidos a partir da difração, que só determina os minerais presentes em uma porcentagem maior do que 5% em volume.

Figura 22: Exemplo de um difratograma de análise total do furo CDMDD0011_06-05, com a mineralogia indicada como exemplo das análises realizadas.

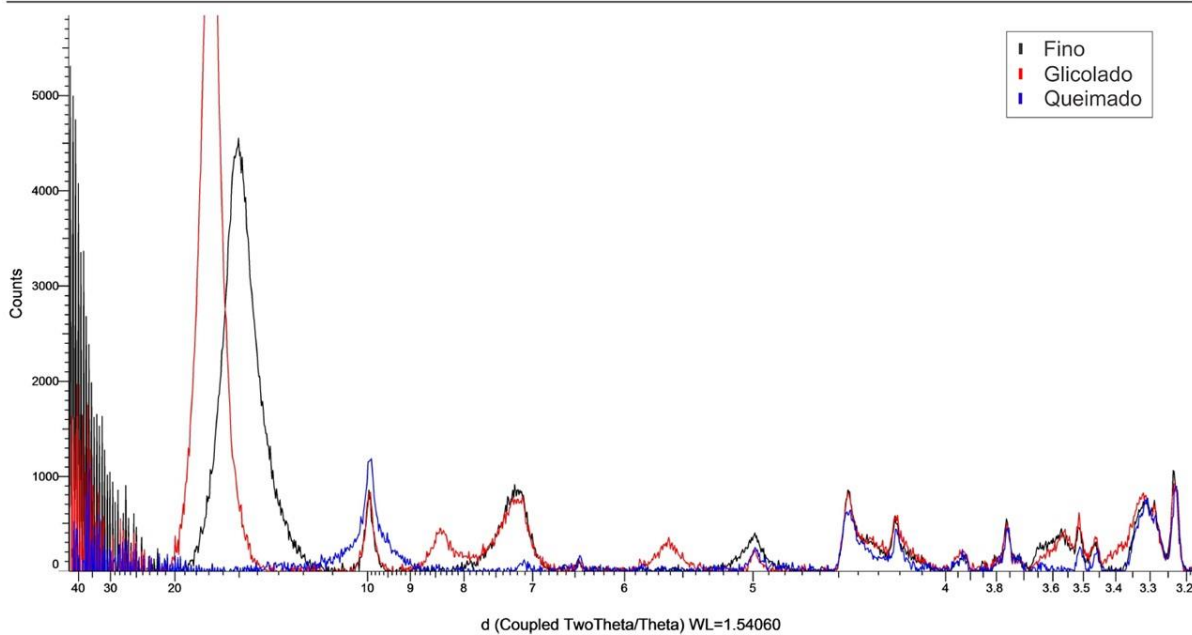
(Coupled TwoTheta/Theta)



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23: Exemplo do tratamento de amostras de finos usando o software DIFFRAC.SUITE EVA do furo CDMDD0011_06-05. O gráfico em preto representa a análise de finos, em vermelho, a análise da amostra glicolada e em azul, a análise da amostra queimada.

(Coupled TwoTheta/Theta)

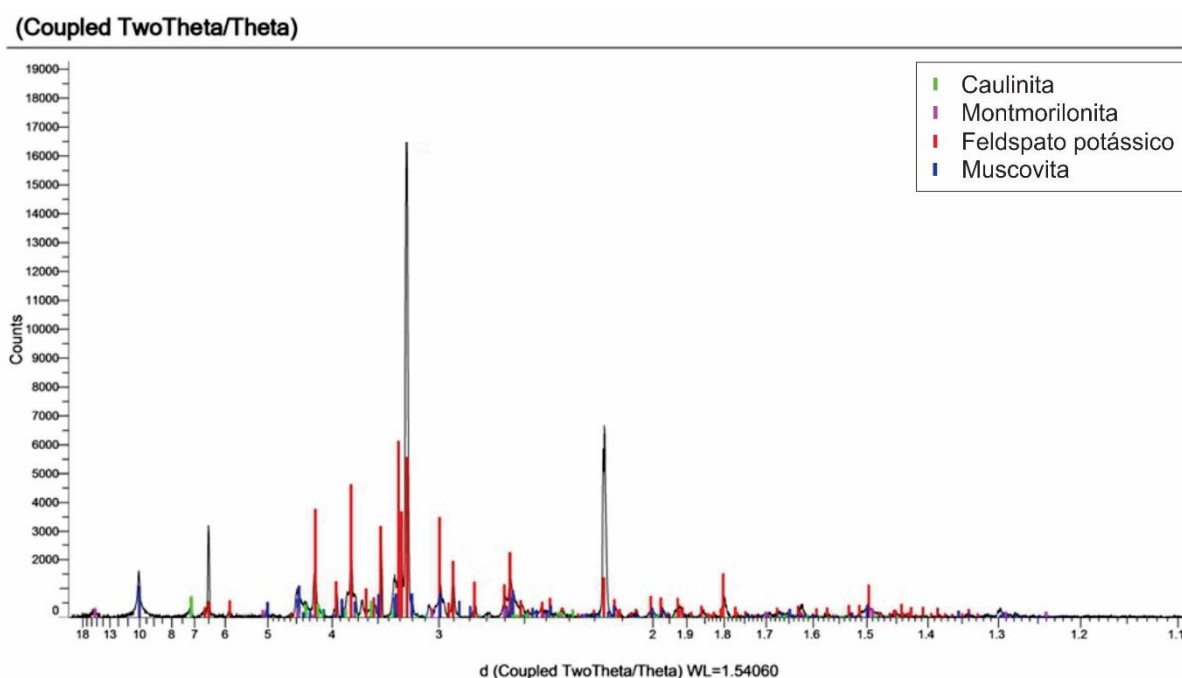


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.2. Soberbo

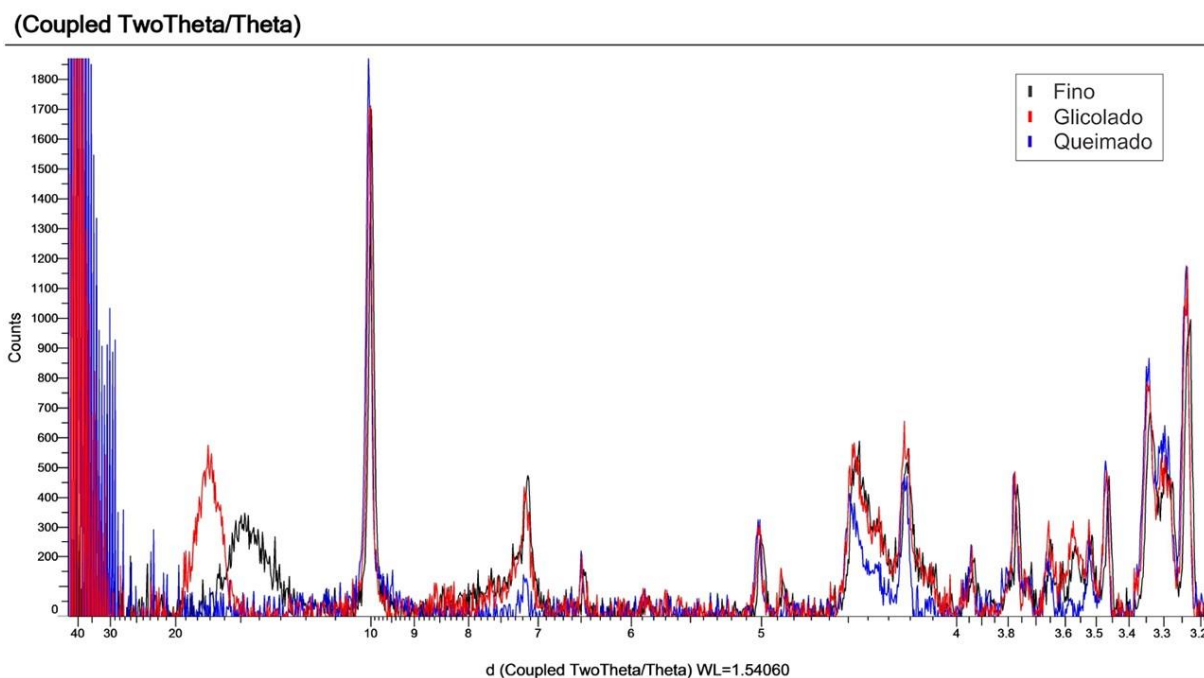
Nos depósitos da área de Soberbo, a mineralogia geral encontrada através dos ensaios de DRX foi o feldspato potássico, halloysita, muscovita, montmorilonita, illita, caulinita, albita, biotita e gibbsita. As interpretações dos difratogramas de análise total (Figura 24) e análise de finos (Figura 25) foram realizadas pelo *software* DIFFRAC.SUITE EVA.

Figura 24: Difratograma de análise total do furo SBDD0007_8.00-8.81, com a mineralogia indicada como exemplo das análises realizadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 25: Difratomogramas sobrepostos de análise de finos do furo SBDD0007_8.00-8.81. O gráfico em preto representa a análise de finos, em vermelho, a análise da amostra glicolada e em azul, a análise da amostra queimada.

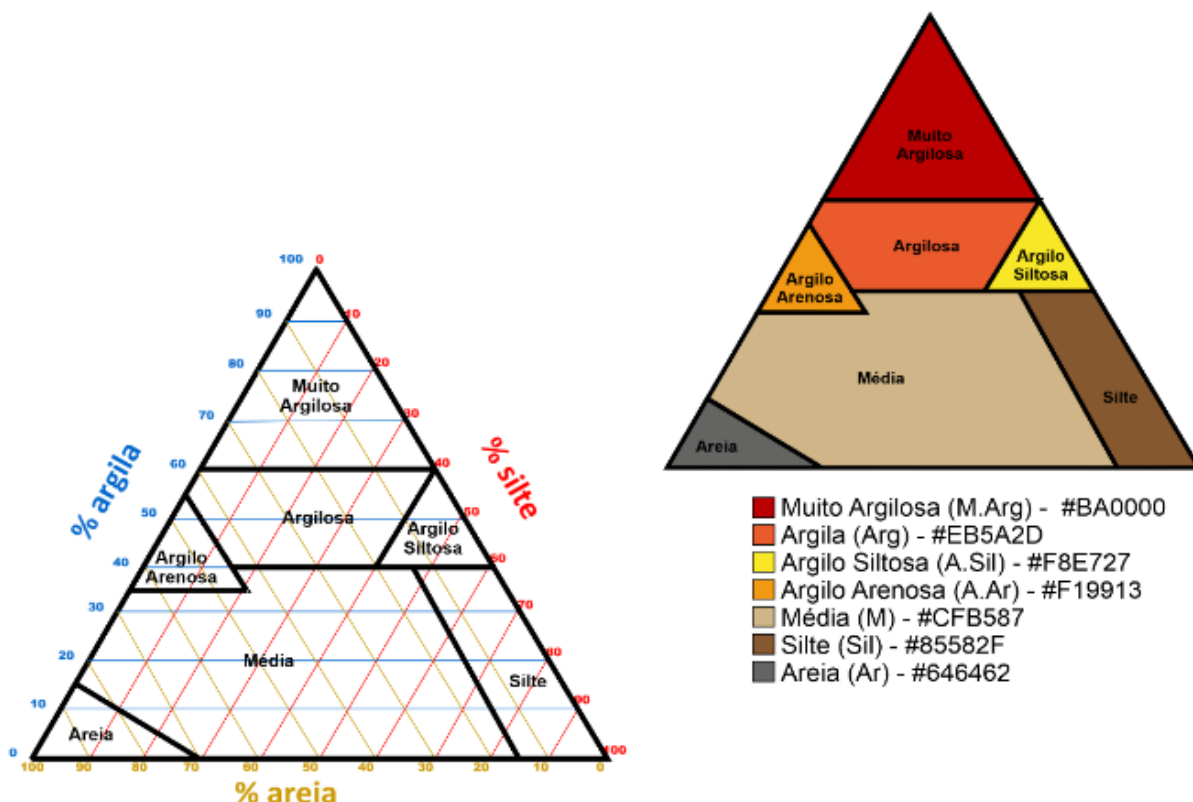


Fonte: Elaborado pela autora.

5.3. Variação da mineralogia nos diferentes tipos de textura do regolito

Os grupos de trabalho do Projeto Caldeira (no âmbito do qual este trabalho foi desenvolvido) e realizaram uma campanha de campo para elaborar a descrição morfológica do regolito. Um dos resultados gerados por essa atividade foi a caracterização textural dos testemunhos de sondagem diamantada disponibilizados pela Meteoric Resources, incluindo grande parte dos furos analisados neste trabalho, com exceção do furo CDMDD0010, com base em um diagrama “Triângulo Textural Simplificado”, adaptado de Gomes e Silva (1962) (Figura 26). Neste triângulo, cada intervalo analisado foi classificado e denominado segundo as porcentagem de areia, argila e silte presentes, gerando as possíveis classificações: muito argilosa, argila, argilo siltosa, argilo arenosa, média, silte e areia.

Figura 26: Triângulo Textural Simplificado utilizado na classificação textural das amostras.



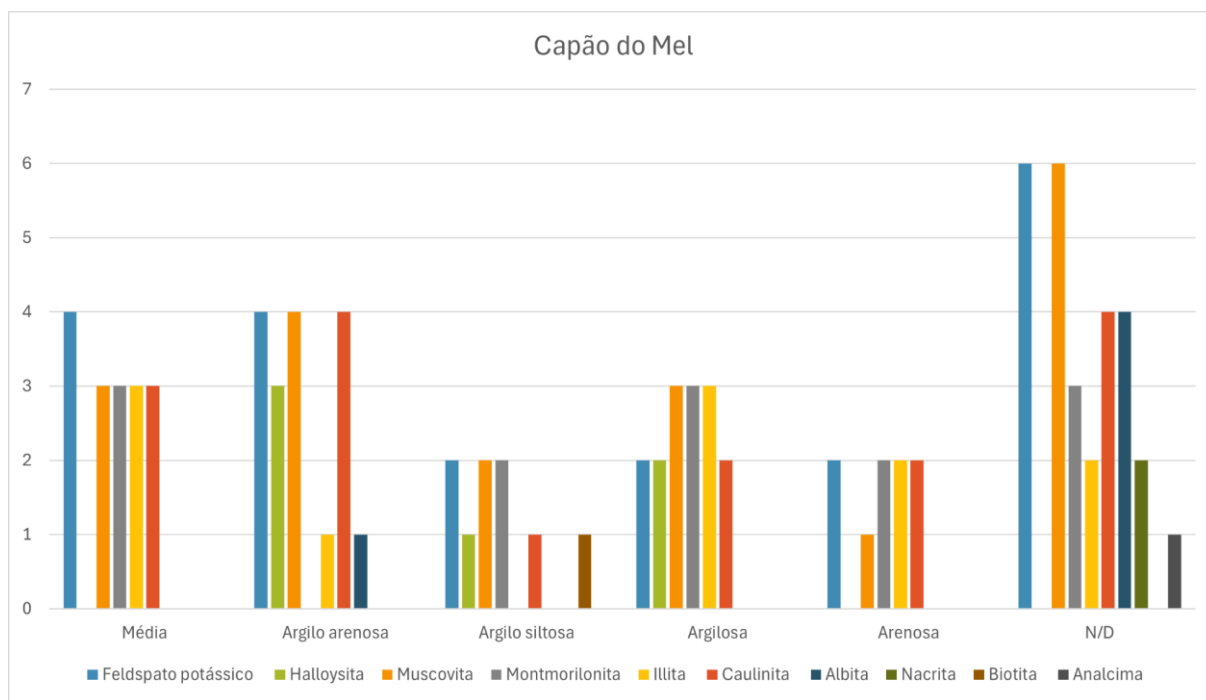
Fonte: Projeto Caldeira, adaptado de Gomes e Silva (1962).

Em conjunto com os dados gerados pelas interpretações do DRX, foi possível comparar a ocorrência dos minerais encontrados com as texturas do regolito. Para isso, foram gerados dois gráficos para quantificar a presença dos minerais em cada textura encontrada nos alvos de Capão do Mel (Figura 27) e Soberbo (Figura 28). É importante ressaltar que a técnica de análise por difração de raios x detecta a presença das fases minerais presentes em quantidades em volume superiores a 5%

No depósito do Capão do Mel, a classificação de texturas abrangeu as categorias: média, argilo arenosa, argilo siltosa, argilosa e arenosa. É importante destacar que não foi possível relacionar todas as ocorrências minerais com as texturas pela ausência dessa classificação no furo 10 e também em alguns intervalos onde não foi possível avaliar a textura, seja pela ausência de amostra no intervalo, ou pela sua qualidade e estado. Nesses casos, os minerais foram classificados como N/D (não disponíveis). Desconsiderando o N/D, as maiores ocorrências de feldspato potássico foram nas texturas média e argilo arenosa, a halloysita e a muscovita tiveram as maiores ocorrências na textura argilo arenosa, enquanto a montmorilonita e a illita ocorreram em maior quantidade nas texturas média e argilosa. A principal ocorrência da caulinita, albita e biotita foi na textura argilo arenosa e da biotita foi em argilo siltosa. A nacrita

e analcima não puderam ser relacionadas com nenhuma textura pela ausência de dados no intervalo de suas ocorrências.

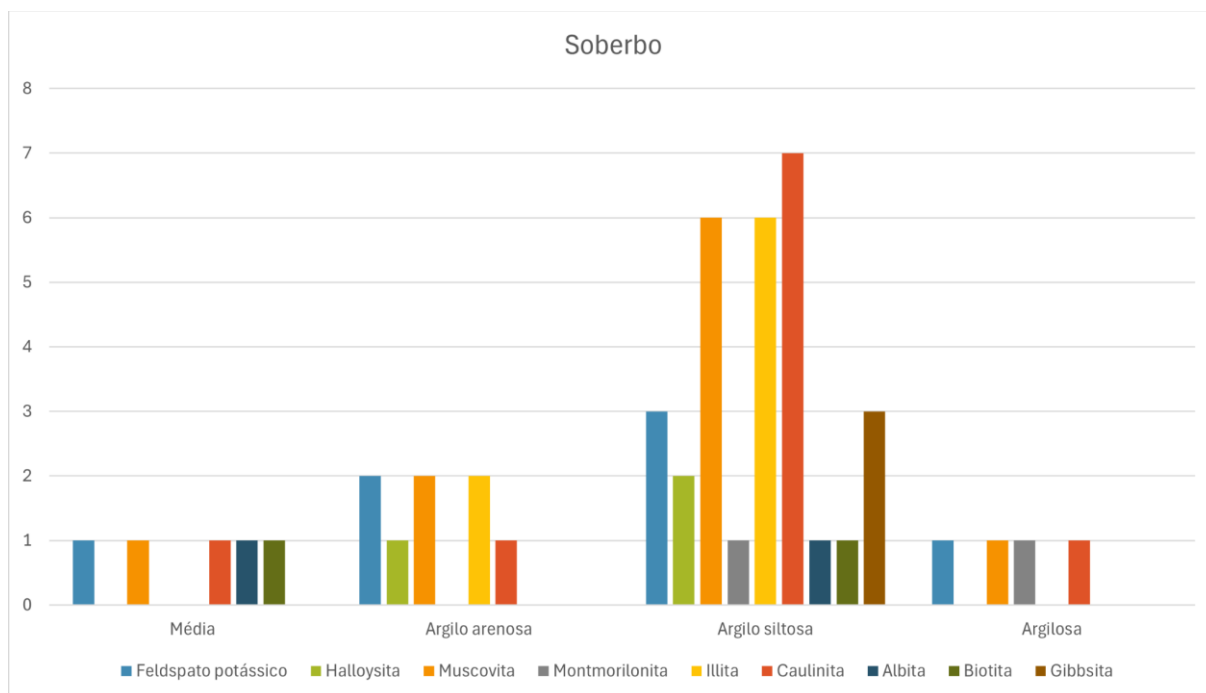
Figura 27: Gráfico de coluna agrupada relacionando os minerais comumente encontrados pela difração com as texturas presentes no perfil regolítico na região do Capão do Mel.



Fonte: Confeccionado pela autora através do *software* Excel.

No depósito de Soberbo, a classificação de texturas abrangeu as categorias: média, argilo arenosa, argilo siltosa e argilosa. Nesse caso, todos os furos e intervalos tiveram classificação textural correspondente, portanto não foi considerada a categoria N/D para ele. Observando o gráfico, nota-se que o feldspato potássico, halloysita, muscovita, illita, caulinita e gibbsita ocorrem principalmente na textura argilo siltosa. A montmorilonita está distribuída igualmente entre as texturas argilo siltosa e argilosa. A albita e a biotita ocorrem igualmente nas texturas argilo siltosa e média.

Figura 28: Gráfico de coluna agrupada relacionando os minerais comumente encontrados pela difração com as texturas presentes no perfil regolítico na região do Soberbo.



Fonte: Confeccionado pela autora através do *software* Excel.

5.4. *Variações da mineralogia do regolito entre os depósitos*

Os dados obtidos para as áreas do Capão do Mel e Soberbo apresentaram semelhanças e diferenças na mineralogia geral e na classificação textural.

A mineralogia geral se assemelha na ocorrência de feldspato potássico, halloysita, muscovita, montmorilonita, illita, caulinita, albita e biotita, mas apresentam diferenças quanto à ocorrência de gibbsita, que foi notada apenas em amostras de Soberbo, enquanto o Capão do Mel apresentou nacrita e analcima. Essa ocorrência pode estar relacionada ao desenvolvimento do perfil de intemperismo, influenciado pela geomorfologia local, assim como a processos de laterização.

A classificação textural nos dois alvos apresenta as categorias média, argilo arenosa, argilo siltosa e argilosa. Nesse ponto, ao observar as figuras 27 e 28, são evidentes as diferenças entre eles, como a categoria arenosa, que ficou restrita ao alvo do Capão do Mel. Ademais, mesmo que as texturas que ocorreram nos dois alvos tiveram diferenças significativas em relação à distribuição mineralógica delas: no Capão do Mel a mineralogia geral é mais distribuída entre as texturas, mas apresenta uma concentração maior em texturas mais grossas, como a média e arenosa, seguida pela textura argilosa, enquanto no Soberbo, a mineralogia geral ocorreu principalmente na textura argilo siltosa.

5.5. Geoquímica dos ETRs ao longo do perfil

A mineralogia geral em conjunto com a textura foram correlacionadas com os valores geoquímicos de ETR leves (ETRL) e pesados (ETRP) disponibilizados pela *Meteoritic Resources*. Para isso, foi montada uma tabela no *software* Excel (Tabela 1), de acordo com os intervalos das amostras analisadas neste trabalho, e esquemas dos perfis dos testemunhos de sondagem diamantada, que serão comentados nos tópicos abaixo com mais detalhes.

Ao observar os dados na tabela, verifica-se que a correlação entre mineralogia geral e das argilas e dos teores de ETR não é direta. Apesar disso, foi possível fazer correlações de detalhe entre os diferentes furos, com relação às texturas, a mineralogia e os teores de ETRL e ETRP. Os dados dos alvos do Capão do Mel e Soberbo foram analisados separadamente e depois foi feita a comparação entre eles, a fim de entender as semelhanças e diferenças, caso fossem notadas. A análise da geoquímica nos alvos foi dividida entre ETRP e ETRL em razão do interesse econômico voltado para os elementos pesados.

Tabela 1: Teores de ETR leves e pesados nos intervalos amostrados e analisados com o DRX, em conjunto com as texturas do perfil regolítico e a mineralogia geral nos alvos do Capão do Mel e Soberbo

Furo	Intervalo (m)		Textura	ETRL	ETRP	Minerais									
CDMDD0007	5.78	6.37	Média	3611	142	Feldspato potássico			Montmorilonita	Illita	Caulinita				
	18	18,6	Argilo arenosa	1757.5	114.01	Feldspato potássico		Muscovita			Caulinita		Albita		
	24	25	Areia média	489.9	78.83	Feldspato potássico		Muscovita		Illita	Caulinita				
CDMDD0008	5	5.25	Argilo arenosa	5029	295.53	Feldspato potássico	Halloysita	Muscovita		Illita	Caulinita				
	5.25	6	Argilo arenosa	5029	295.53	Feldspato potássico	Halloysita	Muscovita			Caulinita				
	9	10	Argilo arenosa	756.1	45.19	Feldspato potássico	Halloysita	Muscovita			Caulinita				
	24	25	-	337.8	43.42	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita	Illita			Albita		
CDMDD0009	1.53	2.26	Argilosa/Argilosa com silte	7150	433.32		Halloysita	Muscovita	Montmorilonita	Illita	Caulinita				
	9.73	11	Média	1787	176.15	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita		Caulinita				
CDMDD0010	4.1	5		4452	326.81	Feldspato potássico		Muscovita		Illita	Caulinita				
	13	14		2940.3	352.16	Feldspato potássico		Muscovita			Caulinita				
	18	19		3218.5	219.41	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita		Caulinita		Albita		Nacrita
	19.28	20		1668.3	159.97	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita		Caulinita		Albita		Nacrita
	6.05	-	Argilo siltosa	12654	909.5	Feldspato potássico	Halloysita	Muscovita	Montmorilonita		Caulinita				
CDMDD0011	7.36	8.53	Argilosa	5674	465.09	Feldspato potássico	Halloysita	Muscovita	Montmorilonita	Illita					
	9.32	10	Argila/Argilo siltosa	3235	265.35	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita		Caulinita			Biotita	
	10	11	Argilosa com pequenas porções de areia	4052	379.42	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita	Illita	Caulinita				
	14.2	-	Arenosa	4538	314.27	Feldspato potássico			Montmorilonita	Illita	Caulinita				
	15.32	-	Média	2391.5	227.83	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita	Illita					
	18	19	Arenosa	1627.3	143.82	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita	Illita	Caulinita				
	21.9	-	-	1380.8	68.59	Feldspato potássico		Muscovita					Albita		Analcima
	3	4	Argilo siltosa	1781.5	131.08		Halloysita			Illita	Caulinita				Gibbsita
SBDD0001	10.4	11.95	Argilo siltosa a Areia média	5742	349.15	Feldspato potássico		Muscovita			Caulinita		Albita	Biotita	
SBDD0007	4.84	5.69	Argilo siltosa	4863	381.12	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita	Illita	Caulinita				
	8	8.81	Argilosa	6570	412.7	Feldspato potássico		Muscovita	Montmorilonita		Caulinita				
SBDD0010	4	5	Argilo siltosa com silte	1172.2	82.08		Halloysita	Muscovita		Illita	Caulinita				Gibbsita
	6.46	7	Argilo siltosa	1615.1	92.6			Muscovita			Caulinita				
	14	15	Argilo siltosa	5190	289.56	Feldspato potássico		Muscovita		Illita	Caulinita				
SBDD0011	15.3		Argilo siltosa	3160	274.24	Feldspato potássico				Illita	Caulinita				
	17	18	Argilo arenosa (areia fina)	3830	318.39	Feldspato potássico		Muscovita		Illita	Caulinita				
	20	21	Argilo arenosa (areia fina)	3375	273.24	Feldspato potássico	Halloysita	Muscovita		Illita	Caulinita				

Fonte: Elaborado pela autora.

5.5.1. Capão do mel

A área do Capão do Mel é representada por 5 furos, caracterizados por uma ampla variedade de teores de ETRP, que foram divididas em 5 classes seguidas de seus respectivos intervalos: (i) menores valores (entre 40 e 80 ppm), (ii) valores baixos (entre 100 e 230 ppm), (iii) valores intermediários (260 e 360 ppm), (iv) valores altos (entre 370 e 470 ppm) e (v) maior

valor (= 909,5 ppm). Essas classes foram definidas no âmbito deste trabalho, buscando facilitar a realização de correlações com a mineralogia.

5.5.1.1. Elementos Terras Raras Pesados

Os menores valores estão atrelados a uma textura relativamente mais grossa, variando entre média e argilo arenosa, e são intervalos mais profundos, entre 24 e 25 m, com exceção do intervalo de 9 a 10m do furo 8. A mineralogia geral nesse caso é parecida: todos os intervalos apresentam feldspato potássico e muscovita, a halloysita ocorre na amostra de profundidade mais rasa do furo 8. Por outro lado, a ocorrência de albita foi notada nas outras amostras originadas de maiores profundidades. A illita ocorreu no maior e no menor valor desse intervalo, de forma que, quando ela ocorreu em conjunto com a caulinita, obteve-se o maior teor, e quando ela ocorreu com a montmorilonita, teve o menor teor.

Os valores baixos ocorreram em intervalos de profundidades intermediárias, variando entre 5 e 20 m, e apresentaram uma textura média a grossa, variando de argilo arenosa, arenosa a média. Nesses valores, o feldspato potássico e a muscovita ocorreram em todas as amostras, e a montmorilonita ocorreu em quase todas, com exceção do intervalo de menor teor, inversamente à ocorrência da caulinita, cuja exceção pertence ao melhor teor de ETRP dessa classe.

Os valores intermediários tiveram profundidades relativamente mais rasas, variando entre 4 e 14,5 m, e apresentaram textura mais grossa, variando de argilo siltosa/arenosa e arenosa. O feldspato potássico e a caulinita estiveram presentes em todas as amostras e alguns dos teores mais baixos dessa classe contaram com a presença de halloysita, sendo que o menor valor está associado à presença da biotita em conjunto com a montmorilonita e muscovita. Quando a montmorilonita ocorreu associada com a muscovita e illita, notou-se que os teores eram intermediários.

Os valores altos ocorreram em profundidades rasas, entre 1,53 e 11 m, com textura relativamente mais fina, variando de argilosa, argilosa com silte e com pequenas porções de areia. O intervalo com o menor teor de ETRP é referente à amostra de textura argilosa com pequenas porções de areia e é a única amostra dessa classe que não apresenta halloysita, enquanto o intervalo de maior teor é o único que não apresenta caulinita em sua mineralogia.

O maior valor ocorreu na amostra de profundidade rasa de 6,05 m e com textura argilo siltosa. É o único caso que apresenta o feldspato potássico, halloysita, muscovita e montmorilonita ocorrendo juntos.

As amostras do Capão do Mel apresentam uma textura mais grossa, se comparadas com as de Soberbo, e que isso parece influenciar na grande variedade de teores de ETRP.

5.5.1.2. Elementos Terras Raras Leves

Além do ETRP, os ETRL também foram caracterizados por uma ampla variedade de teores, divididos em 5 classes seguidas de seus respectivos intervalos: (i) menores valores (entre 300 e 800 ppm), (ii) valores baixos (entre 1300 e 2500 ppm), (iii) valores intermediários (2900 e 4500 ppm), (iv) valores altos (entre 5000 e 7200 ppm) e (v) maior valor (=12654 ppm).

Os menores valores ocorreram em amostras de altas profundidades, entre 24 e 25 m, com uma exceção localizada entre 9 e 10m. A textura é grosseira, variando de argilo arenosa a média. Todas as amostras apresentam feldspato potássico e o melhor teor desta classe apresenta halloysita em sua mineralogia, enquanto o menor teor conta com albita e montmorilonita e a illita ocorreu associada aos menores teores.

Os valores baixos ocorreram em amostras de profundidades intermediárias, entre 9 e 22 m, e apresentaram texturas grosseiras, como argilo arenosa, arenosa e média. Todas as amostras apresentaram feldspato potássico e muscovita, a albita ocorreu em algumas amostras, reforçando sua presença em fases mais empobrecidas em terras raras. A montmorilonita apareceu em algumas amostras e a única amostra que não apresentou caulinita na mineralogia teve o melhor teor da classe.

Os valores intermediários ocorreram em amostras de profundidades rasas a intermediárias, entre 4 e 19 m, de textura variada, porém relativamente mais finas se comparadas com as classes de menores teores, como arenosa, média, com intervalos argilosos, argilo siltoso/com pequenas porções de areia. O feldspato potássico e a caulinita ocorreram em todas as amostras, a muscovita e a montmorilonita ocorreram em quase todas as amostras. A illita ocorreu em amostras com os melhores teores de ETRL da classe, enquanto a biotita e a albita ocorreram associadas a teores e profundidades médias.

Os valores altos ocorreram em amostras de profundidades rasas, entre 1,5 e 9 m, e apresentam as texturas argilosa, argilo arenosa e argilosa com silte. A amostra com maior teor de ETRL da classe não apresentou feldspato potássico. Todas as amostras apresentaram

halloysita e muscovita. A montmorilonita ocorreu associada aos maiores teores, e a illita e a caulinita apareceram em quase todas as amostras. Quando a montmorilonita ocorreu junto com a illita e a caulinita, o teor de ETRL foi o melhor, mas quando ocorreu sem a caulinita, o teor apresentou uma leve queda.

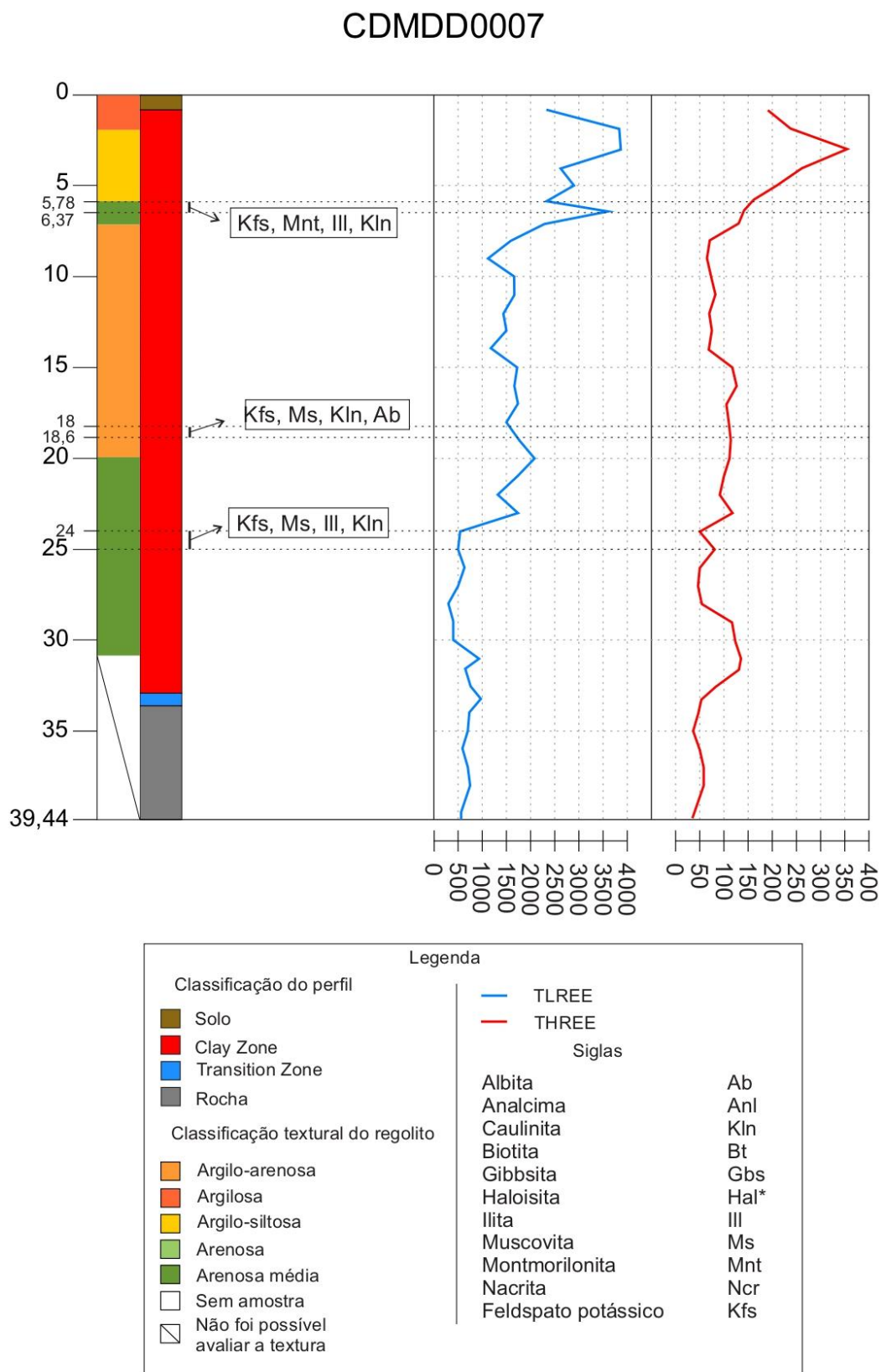
O maior valor de ETRL ocorreu na mesma amostra de maior valor do ETRP: profundidade rasa de 6,05 m e com textura argilo siltosa.

Em uma análise geral, a albita e a biotita ocorrem associadas a valores mais baixos de ETRL, e quando a halloysita e a montmorilonita ocorrem juntas, são associadas a valores mais elevados de ETRL. Essa observação segue o apresentado por Huang *et al.*, (2001), que mostram correlação entre teores mais elevados com halloysita e montmorilonita, em função da maior adsorção iônica.

A analcima e a albita aparecem atreladas aos menores teores de ETR. A presença de halloysita associada a teores elevados de ETR ocorre nos intervalos superficiais dos furos e, quando ela ocorre com a caulinita, a mudança de teores em um furo ocorre de forma mais brusca, mas quando ocorreu sem a caulinita, ocorre uma transição de teores mais gradual. Ademais, os maiores teores de ETR foram associados à ocorrência de halloysita junto com montmorilonita e illita. Comparando os dois alvos, a região do Capão do Mel apresenta texturas mais grossas que o Soberbo, com mais variedades de teor de ETRP e ETRL e maiores teores.

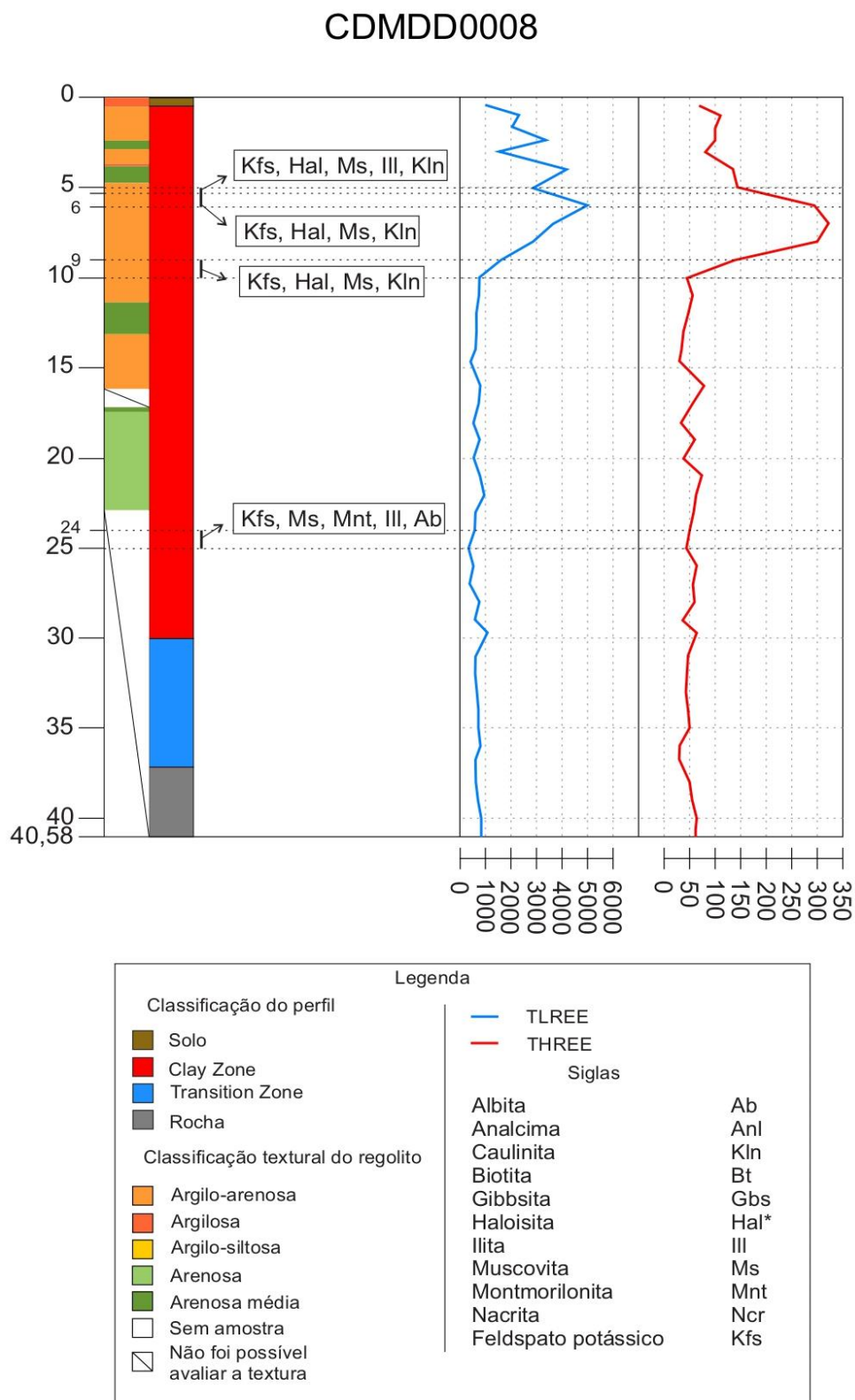
Por fim, além da tabela, foram montados esquemas ilustrativos (Figuras 29, 30, 31, 32 e 33) dos testemunhos de sondagens referentes às amostras do Capão do Mel coletadas para este estudo, utilizando como base o esquema representativo com as classificações da própria *Meteoric Resources*, que dividem os furos em: solo, *clay zone* (zona argilosa), *transition zone* (zona de transição) e a rocha. Em conjunto com os perfis feitos pela *Meteoric*, as ilustrações englobam um perfil com as classificações texturais e os gráficos com os teores de ETRP e ETRL de todo o furo, além de ter os intervalos das amostras indicados em conjunto com as respectivas mineralogias encontradas com as difrações de raios x.

Figura 29: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0007 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela Meteoric Resources, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.



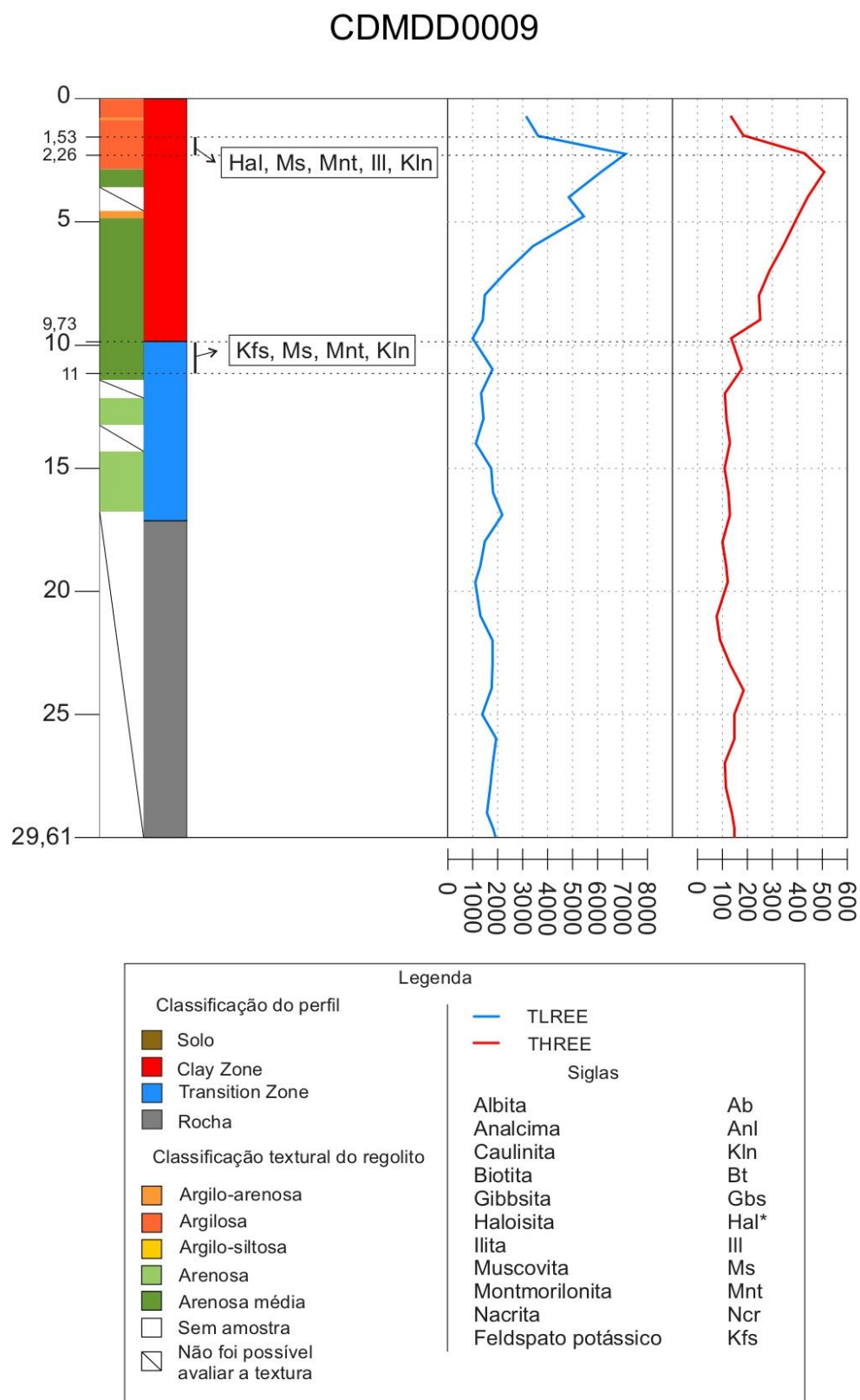
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0008 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela *Meteoric Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.



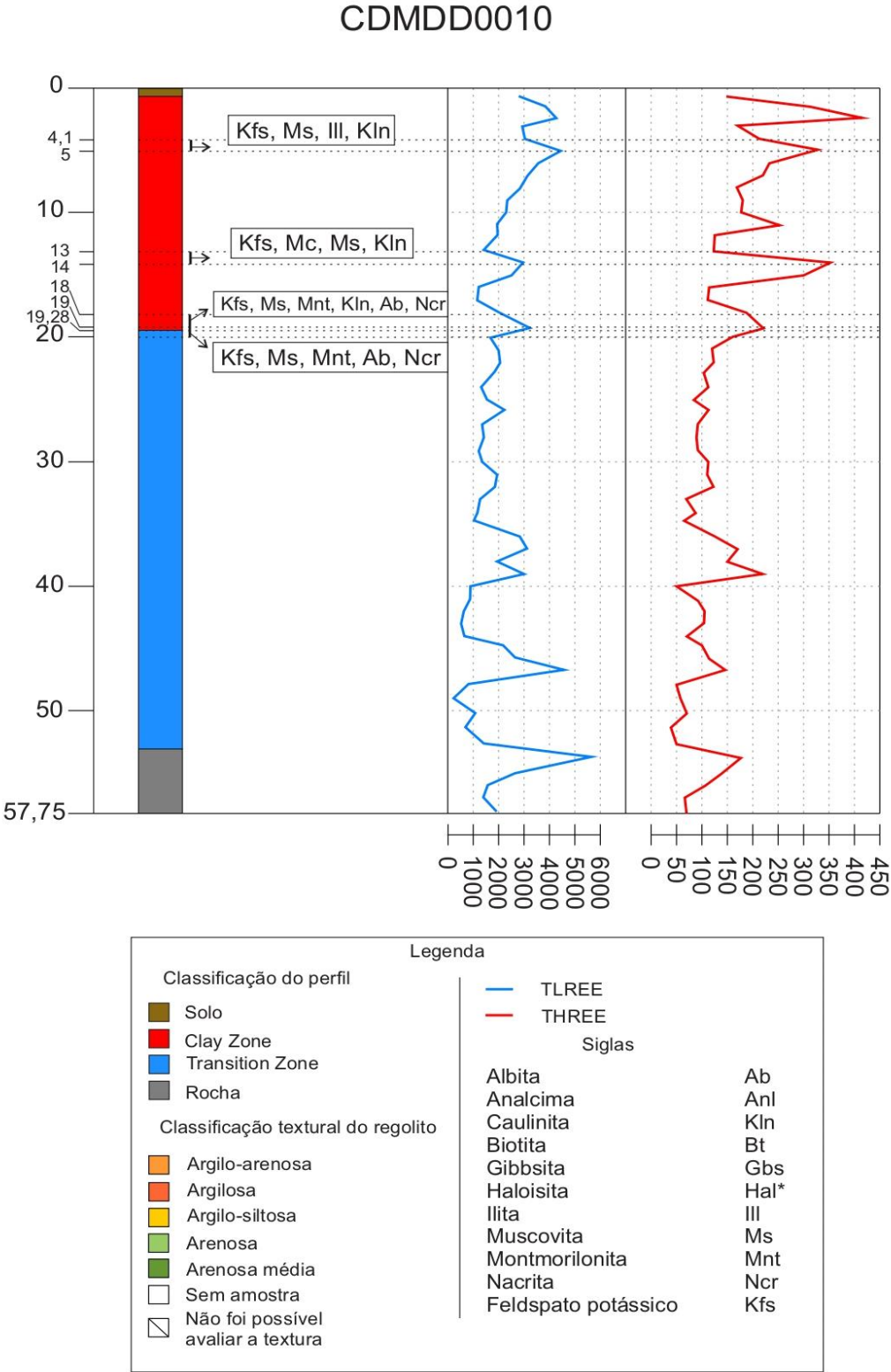
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 31: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0009 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela *Meteoritic Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.



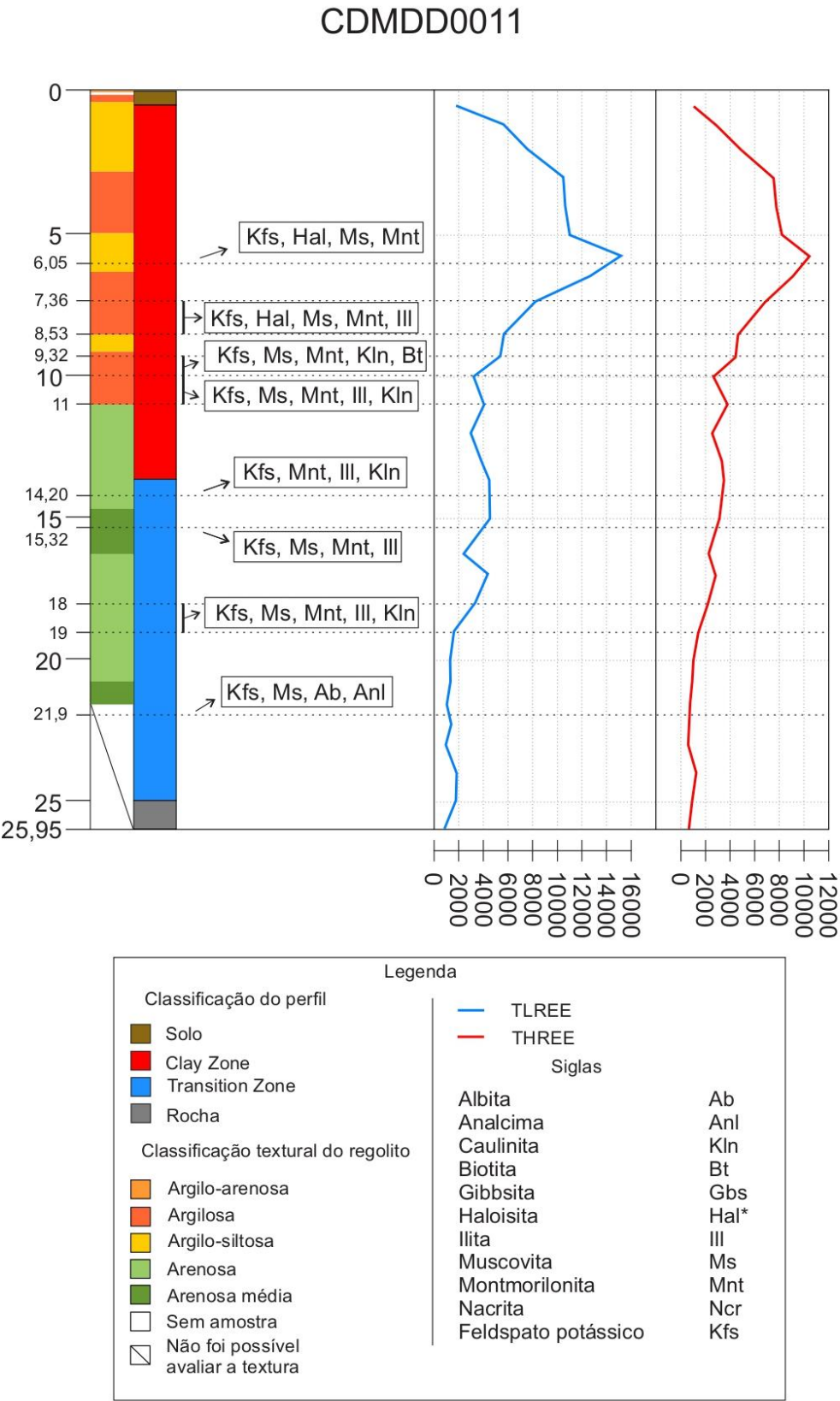
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 32: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0010 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela *Meteoric Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo CDMDD0011 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela *Meteoritic Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.5.2. Soberbo

A área do Soberbo é representada por 4 furos, caracterizados por uma variedade um pouco menor (se comparada com o Capão do Mel) de teores de ETRP: (i) menores valores (entre 80 e 100 ppm), (ii) valores baixos (=131,8m), (iii) valores intermediários (entre 270 e 290 ppm) e (iv) valores elevados (entre 310 e 415 ppm).

5.5.2.1. Elementos Terras Raras Pesados

Os menores valores estão atrelados a amostras de profundidades rasas, entre 4 e 7 m, e apresentam textura argilo siltosa. Todas as amostras apresentaram gibbsita, caulinita, illita e muscovita, e a amostra com o menor teor de ETRP contém halloysita.

Uma amostra apresentou o que foi considerado como valor baixo, com profundidade rasa, de 3 a 4 m, e textura argilo siltosa. Essa amostra apresentou gibbsita, que parece estar relacionada a baixos valores de ETRP, halloysita, illita e caulinita.

As amostras de valores intermediários apresentaram profundidades intermediárias, de 14 a 21 m, e textura argilosa, variando entre argilo siltosa/arenosa de areia fina. Feldspato potássico, muscovita e illita ocorreram em todas as amostras e notou-se que a de menor teor de ETRP apresentou halloysita e é a única que não tem caulinita, além de ter a textura mais grossa da classe (argilo arenosa).

Os valores elevados de ETRP são de amostras de profundidades rasas a médias, entre 4 e 18 m, e apresentam texturas argilosa, argilo siltosa/arenosa. A montmorilonita ocorreu em todas as amostras e a ocorrência de albita e biotita foi notada em um dos menores valores dessa classe. Quando a illita ocorre com a montmorilonita, a amostra apresenta um dos maiores teores de ETRP de Soberbo, quando ocorre sem a montmorilonita, apresenta o menor teor, e quando a montmorilonita ocorre sem a illita, a amostra apresenta o maior teor.

A presença da gibbsita está relacionada aos menores valores de ETRP, a albita, a teores baixos, enquanto a biotita parece estar relacionada a teores elevados.

5.5.2.2. Elementos Terras Raras Leves

Além do ETRP, os ETRL também foram caracterizados por uma baixa variedade de teores, divididos em 3 classes seguidas de seus respectivos intervalos: (i) menores valores (entre 1000 e 2000 ppm), (ii) valores intermediários (entre 3000 e 4000 ppm) e (iii) valores elevados

(entre 5000 e 7000 ppm). Estas classes foram definidas no âmbito deste trabalho, para facilitar a análise de dados.

Os menores valores ocorreram em profundidades rasas, entre 3 e 7 m, e apresentaram textura argilo siltosa. Todas as amostras apresentaram gibbsita, caulinita e illita. A halloysita e a muscovita ocorreram em quase todos os furos e na amostra em que ocorreram juntas, ocorreu o menor valor de ETRL de Soberbo.

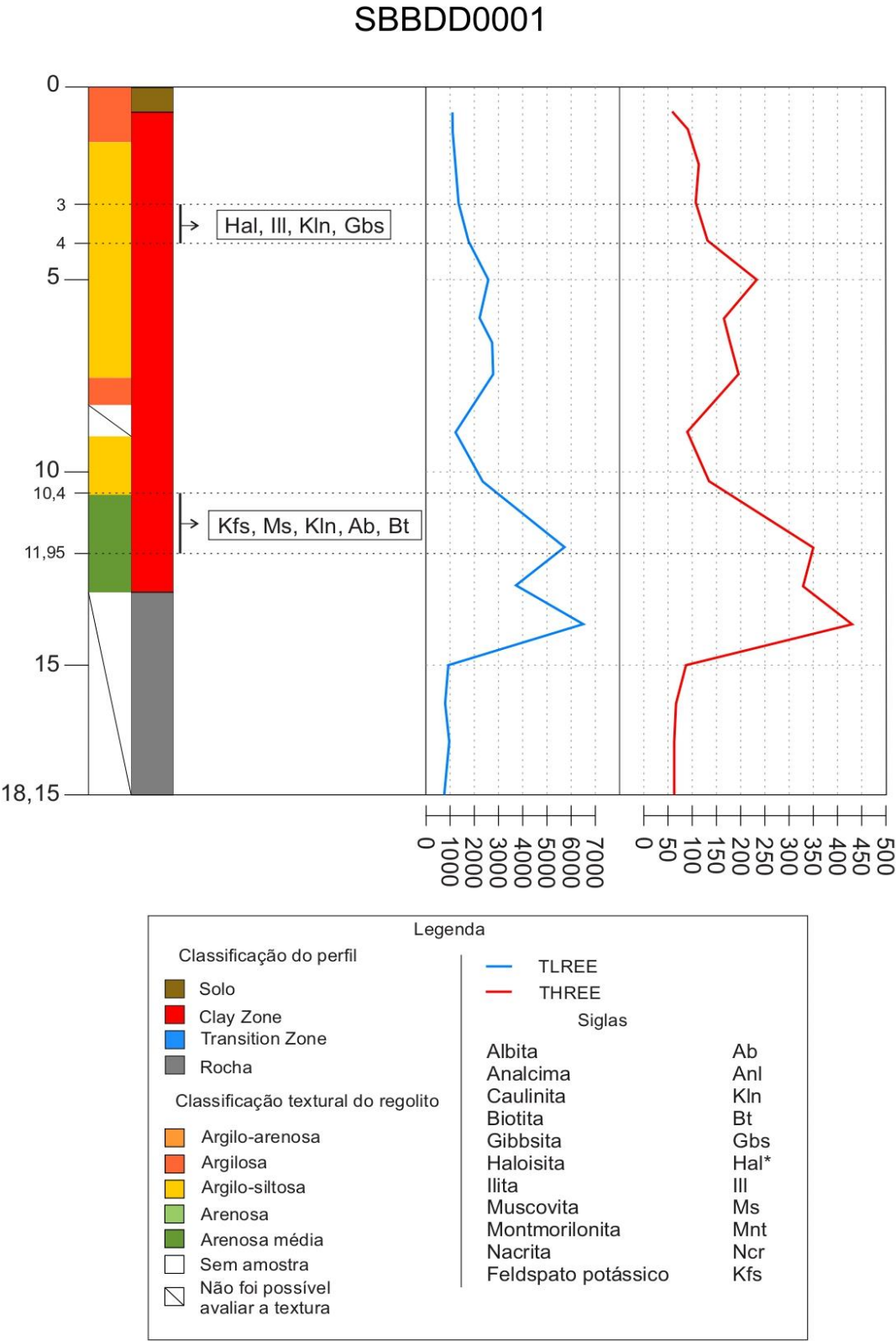
Os valores intermediários ocorreram em profundidades intermediárias, entre 15 e 21 m, e apresentaram texturas argilo siltosa e argilo arenosa. Todas as amostras apresentaram feldspato potássico, muscovita e illita. A halloysita ocorreu na amostra com teor médio e a caulinita ocorreu em quase todas as amostras, mas quando ocorreu na textura argilo siltosa, apresentou um teor menor do que na textura argilo arenosa.

Os valores elevados ocorreram em profundidades médias, de 8 a 15 m, e com textura argilosa a argilo siltosa. O feldspato potássico, a muscovita e a caulinita ocorreram em todas as amostras, a montmorilonita, na amostra de maior teor de ETRL e a illita, na de menor teor.

A gibbsita aparece atrelada aos menores teores de ETR, assim como a albita, que ocorre nos baixos teores. Intervalos com a presença de halloysita tendem a apresentar valores intermediários a altos. Nos casos em que ela ocorre junto com a gibbsita, ela é um indicador de um estágio de maior alteração do regolito, por ser um mineral formado por intemperismo químico com intensa lixiviação sobre rochas ricas em feldspatos. Nesse caso, os teores são baixos, por ser um estágio avançado da alteração do regolito, onde a maior parte dos ETR já foi mobilizada. A ocorrência de montmorilonita juntamente com o feldspato potássico é relacionada a valores elevados de ETR. A região de Soberbo apresenta texturas mais finas que o Capão do Mel, mas também apresenta menos variedades e menores valores de teor de ETRP e ETRL.

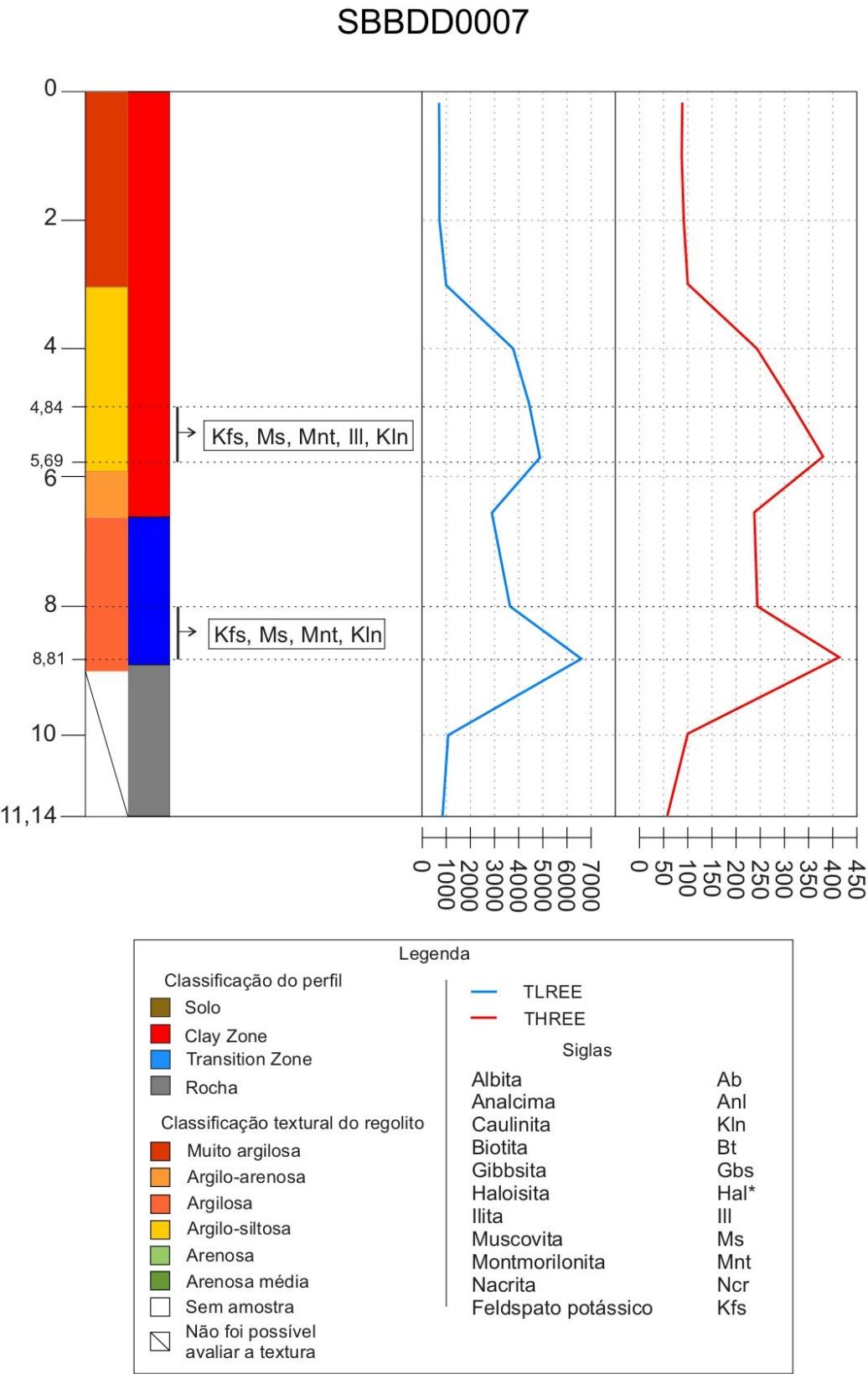
Assim como no caso do Capão do Mel, foram montados esquemas ilustrativos (Figuras 34, 35, 36 e 37) dos testemunhos de sondagens referentes às amostras de Soberbo coletadas para este estudo.

Figura 34: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo SBDD0001 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita *pela Meteoric Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.



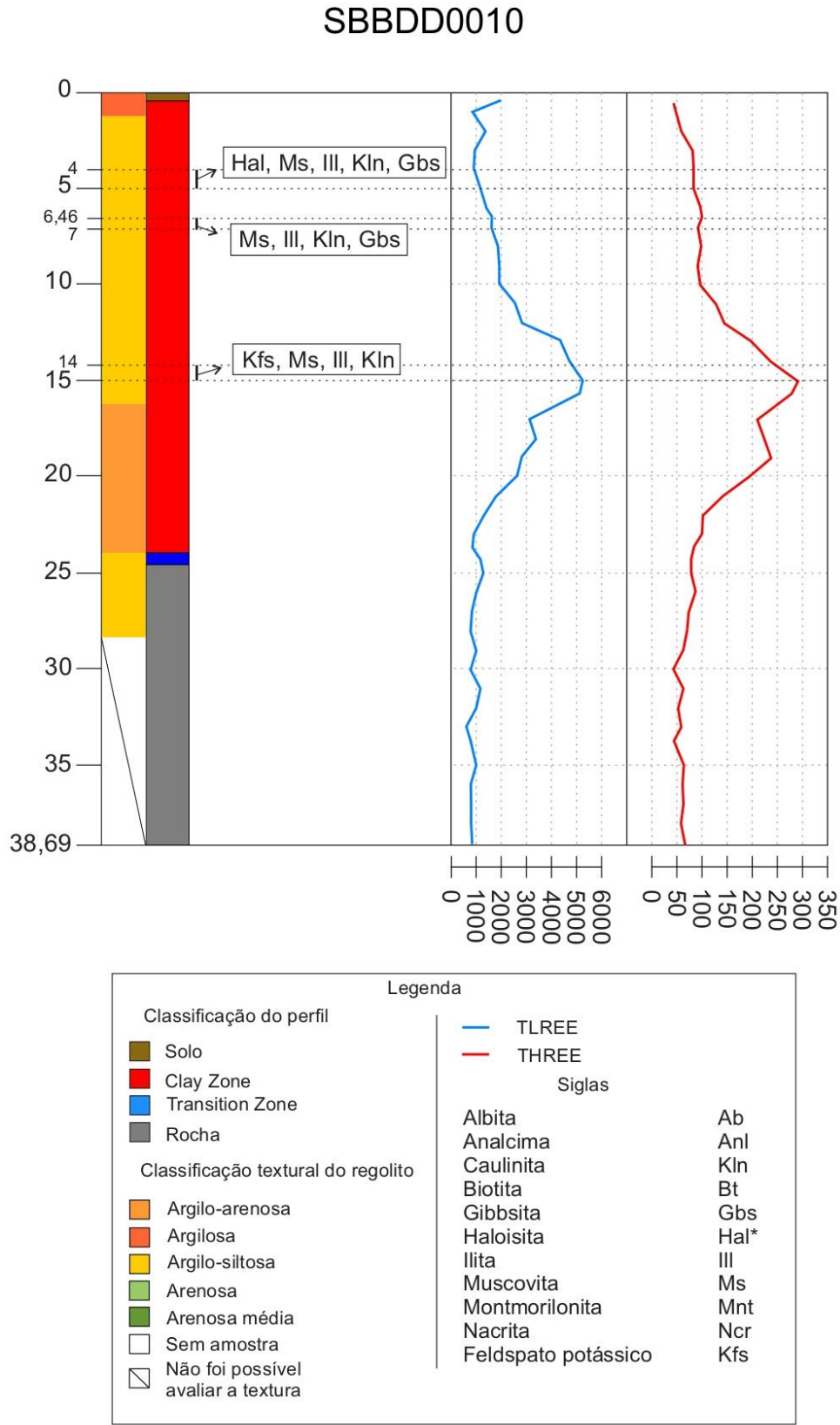
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo SBDD0007 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela *Meteoric Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.



Fonte: Elaborado pela autora.

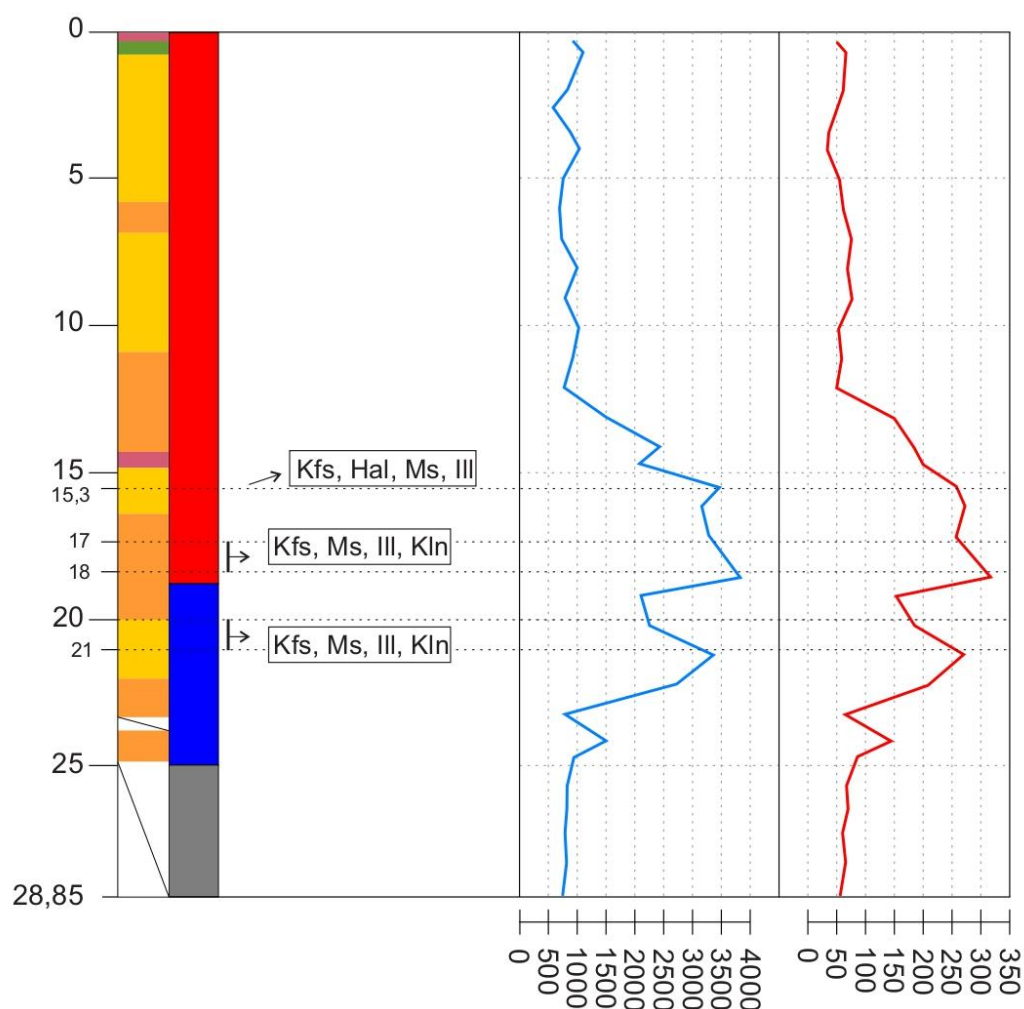
Figura 36: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo SBDD0010 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela *Meteoric Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontrada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 37: Esquema ilustrativo do testemunho de sondagem do furo SBDD0011 com uma coluna de classificação textural do regolito, uma coluna de classificação geral do perfil, feita pela *Meteoric Resources*, com o gráfico com os teores de ETRL e ETRP e com os intervalos das amostras coletadas com as respectivas mineralogias encontradas.

SBDD0011



Fonte: Elaborado pela autora.

6. DISCUSSÃO

6.1. *Evolução do regolito*

A mineralogia geral encontrada se resume principalmente a feldspato potássico, caulinita, illita e halloysita. Outros minerais frequentemente encontrados na literatura (e.g., Elert et al., 2015; Li & Zhou, 2023; K, Feng, Y et al., 2023; Wang, M et al., 2024) neste tipo de depósito, como a esmectita e vermiculita, apesar de não serem citados nos resultados, podem ocorrer. Contudo, trabalhos recentes (e.g., K, Elert et al., 2015, Feng, Y et al., 2023) indicam que esse tipo de depósito de ETR apresenta argilas interestratificadas, principalmente com illita/vermiculita ou esmectita.

Neste cenário, ao observar a mineralogia, nota-se diferentes estágios da ação do intemperismo no perfil. Nas áreas em que o regolito se originou da rocha parental nefelina sienito, por exemplo, a nefelina e a cancrinita são totalmente alteradas e os principais minerais encontrados são o feldspato potássico e a albita, que foram observados ocorrendo juntos em alguns intervalos no Capão do Mel e Soberbo, indicando um provável estágio brando da ação do intemperismo. Evuindo esse cenário, quando o feldspato potássico e a albita são parcialmente a totalmente alterados, os produtos encontrados são a illita, caulinita e halloysita, que foram notados em algumas amostras. Dentro dessas amostras, nota-se que a ocorrência de halloysita acontece em amostras em que não apresentam albita, indicando que esse material foi totalmente alterado, tratando-se de um intemperismo relativamente mais intenso. A presença do feldspato potássico é preservada apesar da intensificação da alteração, por conta de sua natureza mais resistente ao intemperismo. Sua alteração pode ser observada pelo aumento gradual de caulinita: nas amostras, ao observar o feldspato junto com a caulinita, entende-se que o intemperismo químico foi mais intenso do que em amostras em que o feldspato ocorre sem a caulinita. Quando o intemperismo químico é intenso e constante, a illita e a halloysita são substituídas pela caulinita e ela pode alterar para gibbsita, indicando estágios bem mais avançados de intemperismo no perfil, como observado em amostras de Soberbo.

A mineralogia encontrada é condizente com o que é relatado na literatura, mas algumas diferenças foram observadas, como maior quantidade de argilas expansivas em algumas localidades e maior quantidade de minerais interestratificados, que são relacionados ao hidrotermalismo (e.g., K, Elert et al., 2015, Feng, Y et al., 2023).

6.2. *Teor e mineralogia ao longo do perfil regolítico*

Ao longo do perfil regolítico, não foi observada uma correlação direta entre a mineralogia e teor de ETR, quando se analisa a geoquímica. O teor pode estar relacionado a alteração dos minerais e pela presença de minerais resistatos, como zircão e titanita, e a recuperação metalúrgica parece estar associada à presença de materiais coloidais, de forma que quanto mais fases mais finas, pior é a recuperação metalúrgica, por exemplo. Esta questão vem sendo estudada por outros pesquisadores integrantes do Projeto Caldeira.

Na questão da alteração, argilominerais como a halloysita e caulinita tendem a se alterar para a gibbsita quando são submetidas a um intenso intemperismo químico, e o teor de ETR tende a diminuir (Zhou et al., 2021; M, Wang et al., 2024), como foi observado nas amostras com gibbsita na área de Soberbo.

Em partes onde o intemperismo é menor, a illita se torna um mineral mais importante e abundante que a halloysita e passa a concentrar mais ETR, além de apresentar maior capacidade de adsorção do que os minerais do grupo da caulinita, que têm um melhor desempenho de adsorção em profundidades mais superficiais (Ma e Eggleton, 1999; Hirst et al., 2017; Alshameri et al., 2019; Yang et al., 2019; Wang et al., 2024).

Conforme o intemperismo químico atua na região, a chuva ácida e a natureza ácida dos fluidos que percolam os solos (Nesbitt, 1979; Coppin et al., 2002; Li, M.Y. H., et al., 2019; Yang et al., 2019; Wang, M et al., 2024) atuam na mobilização de ETR que antes estavam adsorvidos em minerais como illita e halloysita para maiores profundidades (Braun et al., 1990; Wood, 1990; Li et al., 2017, 2020; Huang, J., et al., 2021a; Wang, M et al., 2024).

Já para os minerais resistatos, os principais encontrados na região, e também comentados na literatura, são a titanita e o zircão. Eles ocorrem como mineralogia acessória, representando menos de 5% em volume nas amostras e por isso não apareceram nas análises de DRX. Nesse caso, eles estão relacionados com o teor de forma que eles aprisionam os ETR, levando ao aumento do teor, mas apresentam baixa recuperação, pois não liberam os ETR tão facilmente como nos argilominerais. Estes minerais, no entanto, podem ser a chave para a compreensão de como ocorreu a mobilização dos elementos de terras raras no perfil ao longo do tempo e como foi a influência do hidrotermalismo e do intemperismo em sua concentração.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho encontrou, através de análises de difração de raios x, minerais como feldspato potássico, halloysita, muscovita, montmorilonita, illita, caulinita, albita, biotita, nacrita, analcima e gibbsita, que são característicos em depósitos de ETR. A presença de halloysita, caulinita e illita sugerem a influência do intemperismo, enquanto a presença de argilas expansivas e/ou interestratificadas, sugerem influência hidrotermal no ambiente. A confirmação da ocorrência de halloysita, tal qual ocorre nos depósitos chineses, deverá ser confirmada por realização de microscopia eletrônica de varredura, onde se confirmará sua presença ao observar a morfologia tubular de seus cristais.

As áreas do Capão do Mel e Soberbo apresentam semelhanças e diferenças nas questões mineralógicas e texturais. Embora compartilhem minerais como o feldspato potássico, halloysita e muscovita, o soberbo se diferencia pela presença de gibbsita, indicando áreas mais alteradas, do ponto de vista intempérico. Na classificação textural, a principal diferença está na distribuição de texturas: o Capão do Mel possui maior diversidade, com destaque para texturas média e arenosa, enquanto o Soberbo tem destaque para a textura argilo siltosa. As áreas compartilham diversas características em relação à mineralogia e textura, mas suas diferenças são notáveis, provavelmente devido às diferentes rochas que originaram os depósitos na região.

Apesar da aplicação do método de análise de difração de raios x ter gerado tantos resultados, entendeu-se que ele tem algumas limitações: a obtenção de resultados mais precisos requer experiência do usuário, a exemplo de minerais que não foram identificados nas análises deste trabalho, como o caso da vermiculita e esmectita, que têm picos muito próximos ao da montmorilonita, e também em casos que o volume não chega a 5%, dificultando a detecção das fases pelo equipamento. Além disso, os ensaios laboratoriais precisam ser muito bem executados para evitar a contaminação e orientação de amostras.

A correlação entre mineralogia, geoquímica e recuperação das ETR pós lixiviação poderá ser mais bem explorada em trabalhos futuros. Além disso, esse trabalho pode contribuir para estudos de detalhe da geoquímica explorando a mobilidade dos ETRP e ETRL, ou para explorar a correlação entre a difração com a petrografia.

Como sugestão para trabalhos futuros podem ser citados: realização de microscopia eletrônica de varredura das amostras aqui estudadas (para a confirmação a respeito das fases, em função da morfologia dos cristais e também análises químicas pontuais); correlação da mineralogia, teores, granulometria e recuperação metalúrgica, com a finalidade de compreender

qual seria o “tipo” de minério que renderia melhores resultados pós-lixiviação; realização de ensaios de capacidade de troca de cátions, para correlação com teores e recuperação, para suporte também ao cenário ideal de lixiviação e por fim, a reunião de todos estes dados, para fomentar a proposição de um modelo genético baseado na mineralogia e recuperação metalúrgica, de forma a complementar o atual modelo de argilas iônicas.

REFERÊNCIAS

ALBERS, Ana Paula F. et al. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, v. 48, p. 34-37, 2002.

ANDRADE, Romualdo. **TERRAS RARAS**, 2013. Disponível em: <https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?idbancoarquivoarquivo=9006>. Acesso em: 02/10/2023

BERNARDES, Júlio. Valiosas e versáteis: pesquisas com terras raras mostram caminho para criar cadeia produtiva no Brasil. **Jornal da USP**, 2021. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/valiosas-e-versateis-pesquisas-com-terras-raras-mostram-caminho-para-criar-cadeia-produtiva-no-brasil/>> Acesso em: 02/10/2023.

BONOTTO, Daniel Marcos; FUJIMORI, K.; MOREIRA-NORDEMANN, L. M. Determination of weathering rate of the Morro do Ferro Th-REEs deposit, Brazil using U-isotope method. **Applied radiation and isotopes**, v. 65, n. 5, p. 474-481, 2007.

BOUÇAS, C. 2023. Australiana Meteoric Resources anuncia investimento de 1,5 Bilhões de Reais em Minas Gerais. **Jornal Valor Econômico**, 2023. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia>. Acesso em 30/11/2023.

DE ANDRADE, H. P. Terras raras. **Departamento Mineral de Produção Mineral. Sumário Mineral**, 2014.

DE ASSIS JANASI, Valdecir. Elemental and Sr–Nd isotope geochemistry of two Neoproterozoic mangerite suites in SE Brazil: implications for the origin of the mangerite–charnockite–granite series. **Precambrian Research**, v. 119, n. 1-4, p. 301-327, 2002.

DE SOUZA SARDINHA, Diego et al. Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais. **Geologia USP. Série Científica**, v. 18, n. 1, p. 259-272, 2018.

Elementos terras raras – o que são, aplicações e mercado mundial. **Core Case**, 2022. Disponível em: <<https://corecase.com.br/pt/2022/11/08/elementos-terras-raras-o-que-sao-aplicacoes-e-mercado-mundial/#:~:text=Depósitos%20de%20Terras%20Raras%20no%20Brasil&text=Depósitos%2>>

Ode%20ETR%20ocorrem%20em,e%20concentração%20por%20processos%20superficiais>.

Acesso em: 02/10/2023.

ELERT, Kerstin; PARDO, Eduardo Sebastián; RODRIGUEZ-NAVARRO, Carlos. Mineralogical evolution of di-and trioctahedral smectites in highly alkaline environments. **Clays and Clay Minerals**, v. 63, n. 6, p. 414-431, 2015.

ELLERT, Reinholt. Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, n. 18, p. 5-60, 1959.

ESTRADE, Guillaume et al. REE concentration processes in ion adsorption deposits: Evidence from the Ambohimirahavy alkaline complex in Madagascar. **Ore Geology Reviews**, v. 112, p. 103027, 2019.

FENG, Yuzhou et al. Hydrothermal alteration of magmatic titanite: Implications for REE remobilization and the formation of ion-adsorption HREE deposits, South China. **American Mineralogist**, v. 108, n. 11, p. 2051-2064, 2023.

FERRONI, Felipe Rodrigues; MELLO, Claudio Limeira; DESTRO, Nivaldo. Tectonic control on the Cabo Frio anorogenic magmatic lineament, Southeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 83, p. 37-54, 2018.

GARDA, Gianna Maria. **Alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do maciço alcalino de Pocos de Caldas, MG-SP**. 1990. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990. doi:10.11606/D.44.1990.tde-02092013-144159. Acesso em: 2024-11-08.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de Cimento Portland**. 2009. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. doi:10.11606/T.44.2009.tde-23072009-144653. Acesso em: 2024-11-08.

GOUVEA, Almir Donizette Vicente; NAVARRO, Fabiano Cabañas; DEL ROVERI, Carolina. Terras raras: Considerações sobre o planalto de Poços de Caldas, MG no novo cenário mundial. **Holos**, v. 4, p. 101-109, 2014.

GUARINO, Vincenza et al. Mineralogy and geochemistry of a giant agpaitic magma reservoir: The Late Cretaceous Poços de Caldas potassic alkaline complex (SE Brazil). **Lithos**, v. 398, p. 106330, 2021.

HUANG, Yufeng et al. Characteristics and genesis of ion adsorption type REE deposits in the weathering crusts of metamorphic rocks in Ningdu, Ganzhou, China. **Ore Geology Reviews**, v. 135, p. 104173, 2021.

JANASI, Valdecir de Assis. **Petrogênese de granitos crustais na Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé (SP-MG): uma contribuição da geoquímica elemental e isotópica**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

JOWITT, Simon M.; MCNULTY, Brian A. Battery and energy metals: Future drivers of the minerals industry?. **SEG Newsletter**, n. 127, p. 11-18, 2021.

LI, Martin Yan Hei; ZHOU, Mei-Fu. Physicochemical variation of clay minerals and enrichment of rare earth elements in regolith-hosted deposits: exemplification from the Bankeng deposit in south China. **Clays and Clay Minerals**, v. 71, n. 3, p. 362-376, 2023.

LI, Xurui et al. Microorganisms accelerate REE mineralization in supergene environments. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 88, n. 13, p. e00632-22, 2022.

LIMA, Paulo César Ribeiro. Terras-raras: elementos estratégicos para o Brasil. **Brasília: Câmara dos Deputados–Consultoria Legislativa**, 2012.

MELO, Rodrigo; OLIVEIRA, Marcos. Geologia e litogeoquímica de migmatitos, charnockitos e granulitos do Complexo Guaxupé na região de São João da Boa Vista (SP). **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 2, p. 253-272, 2013.

METEORIC. Caldeira Ree. Meteoric. Disponível em: <<https://meteoric.com.au/portfolio/caldeira-ree/>> Acesso em: 08 nov. 2024.

MIEKELEY, N. et al. Rare-earth elements in groundwaters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Poços de Caldas, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 45, n. 1-3, p. 365-387, 1992.

MONTEIRO, Vinícius Arcanjo. **Maquete do patrimônio geológico do maciço alcalino de poços de caldas, divisa sp/mg**, [S.l.], n. 15, p. 159-176, fev. 2020. ISSN 2317-8825.

Disponível em: <https://www.revistacontinentes.com.br/index.php/continentes/article/view/211>>. Acesso em: 08 nov. 2024.

MORA, Claudio Alejandro Salazar; NETO, Mario da Costa Campos; BASEI, Miguel Angelo Stipp. Syn-collisional lower continental crust anatexis in the Neoproterozoic Socorro-Guaxupé Nappe System, southern Brasília Orogen, Brazil: Constraints from zircon U–Pb dating, Sr–Nd–Hf signatures and whole-rock geochemistry. **Precambrian Research**, v. 255, p. 847-864, 2014.

MORAES, Lucia; S. Hildor. **Terras Raras**, 2018. *Recursos Minerais de Minas Gerais*. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/terras-raras/#mineralogia>>. Acesso em 08/10/2023.

NETO, Mario da Costa Campos; CABY, Renaud. Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the nappe system south of the São Francisco Craton, southeast Brazil. **Precambrian Research**, v. 97, n. 1-2, p. 3-26, 1999.

NETO, MC Campos; JANASI, V. A.; CABY, R. Ocorrência de granulitos empobrecidos nas porções basais da Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé. **Boletim IG-USP. Publicação Especial**, n. 18, p. 11-13, 1996.

PADRONES, Jenielyn T.; IMAI, Akira; TAKAHASHI, Ryohei. Geochemical behavior of rare earth elements in weathered granitic rocks in northern Palawan, Philippines. **Resource Geology**, v. 67, n. 3, p. 231-253, 2017.

ROBB, Laurence. **Introduction to ore-forming processes**. John Wiley & Sons, 2013.

RODRIGUES, Tarcisio Ewerton. **Caracterização e gênese de solos Brunos do maciço alcalino de Poços de Caldas (MG)**. 1984. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANEMATSU, Kenzo; KON, Yoshiaki. Geochemical characteristics determined by multiple extraction from ion-adsorption type REE ores in Dingnan County of Jiangxi Province, South China. **Bull. Geol. Surv. Jpn**, v. 64, p. 313-330, 2013.

SANEMATSU, Kenzo; WATANABE, Yasushi. **Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits**. 2016.

TARGA, D. A.; MOREIRA, C. A.; CAMARERO, P. L. Diagnóstico hidrogeológico da Mina Osamu Utsumi (Poços de Caldas - MG) por meio de análise estrutural e ensaio geofísico. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29301>. Acesso em: 8 nov. 2024.

ULBRICH, H. H. G. J. et al. Structure and origin of the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil. **Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform**, v. 1, p. 367-418, 2005.

WABER, Niklaus. The supergene thorium and rare-earth element deposit at Morro do Ferro, Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 45, n. 1-3, p. 113-157, 1992.

WANG, Min et al. Enrichment of Rare Earth Elements During the Weathering of Alkaline Igneous Systems: Insights from the Puxiong Regolith-Hosted Rare Earth Element Deposit, SW China. **Economic Geology**, v. 119, n. 1, p. 161-187, 2024.

WILSON, M. J. Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates. **Clay Minerals**, v. 39, n. 3, p. 233-266, 2004.

WU, Zhenxiao et al. Review of rare earth element (REE) adsorption on and desorption from clay minerals: Application to formation and mining of ion-adsorption REE deposits. **Ore Geology Reviews**, v. 157, p. 105446, 2023.