



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GEOLOGIA

CALEBE GARCEZ NASCIMENTO MENDONÇA DE SOUZA

**OCORRÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS NOS REGÓLITOS DO
BATÓLITO PEREIRO E FAIXA-ORÓS JAGUARIBE**

FORTALEZA

2026

CALEBE GARCEZ NASCIMENTO MENDONÇA DE SOUZA

**OCORRÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS NOS REGÓLITOS DO
BATÓLITO PEREIRO E FAIXA-ORÓS JAGUARIBE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Geologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção de título de Geólogo.

Orientador: Prof. Dr. Christiano Magini
Co-Orientadora: Profa. Dra. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro

FORTALEZA

2026

CALEBE GARCEZ NASCIMENTO MENDONÇA DE SOUZA

OCORRÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS NOS REGÓLITOS DO
BATÓLITO PEREIRO E FAIXA-ORÓS JAGUARIBE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Curso de Geologia do
Departamento de Geologia da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção de título de
Geólogo.

Aprovado em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Christiano Magini.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Irani Clezar Mattos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Antonio Leal Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e à espiritualidade, que se fizeram presentes em todos os momentos desta trajetória, oferecendo amparo, força e equilíbrio, mesmo nos períodos em que estive fisicamente distante de minha família.

Aos meus pais, Carlos Alberto Rodrigues de Souza e Jamliex Garcez Nascimento Mendonça, expresse minha mais profunda gratidão pelo apoio incondicional, pela paciência e pela perseverança em sempre acreditar em mim, mesmo diante das dificuldades. À minha irmã, Kissyla Garcez Nascimento Mendonça de Souza, e à minha sobrinha Alyssa Mendonça Bennett, que, mesmo sem termos convivido, representa um vínculo afetivo importante em minha vida, deixo registrado meu carinho e reconhecimento. À minha querida tia Jamliex Garcez, meus primos Dyego Mendonça e Thiago Mendonça pelos conselhos em permanecer no curso.

Agradecer ao meus avós maternos José Nascimento Mendonça (in memorian), Alaíde Garcez (in memorian), avós paternos Adão Antunes Luz (in memorian) e Rosa Luz (in memorian) e ao meu tio Jamberg Garcez Nascimento Mendonça (in memorian) que sempre souberam o valor da educação e foram os meus maiores incentivadores a permanecer estudando.

Agradecer aos meus professores do IFES Nova Venécia, Wagner Andrade (in memorian), Pillar Carvalho, Weverton Sacramento, pois foram os precursores no ensino da geologia.

Agradecer aos professores da UFOB Barreiras, Éder Medeiros, Geraldo Leahy, Mariane Torres, Luis Gomes, Elaine Martins pelos ensinamentos em mapeamentos geológicos estruturais que foram vital no desenvolvimento da minha carreira.

Agradecer ao meu amigo fraterno Victor Cremasco Mendonça, Marina Krauser, João Victor Cremasco e Victória Cremasco pelo total apoio nesse projeto.

Agradeço de forma especial ao meu amigo João Paulo Barbosa da Capivara, cuja amizade se tornou laços de irmandade. Seu apoio, confiança e presença constante foram fundamentais ao longo dessa caminhada, reafirmando que há amizades que se tornam tão sólidas quanto vínculos familiares.

Registro também meu sincero agradecimento aos psicólogos Mikael Sotero e Paulo Ferre pelas inúmeras horas de escuta, diálogo e acolhimento, que foram essenciais para meu fortalecimento emocional durante o processo de formação acadêmica e pessoal até a conclusão da graduação.

À Universidade Federal do Ceará, expresse minha gratidão por tornar possível a concretização deste sonho, oferecendo não apenas formação técnica e científica, mas também acolhimento, incentivo e oportunidades de crescimento humano e profissional.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Christiano Magini, pelos ensinamentos, pela orientação constante e pelo apoio ao longo da execução deste e de outros trabalhos, além de demonstrar, na prática, a seriedade, a dedicação e a beleza da profissão de geólogo e professor.

Ao Laboratório LGMA, agradeço pelo suporte técnico, pela disponibilização das peneiras e dos equipamentos acessórios utilizados no desenvolvimento da pesquisa, bem como a todos os profissionais envolvidos. Agradeço também ao Laboratório de Microscopia Eletrônica, pela realização das análises em MEV-EDS, fundamentais para a obtenção dos resultados deste trabalho.

Agradeço a Pró-Reitoria de Assistência Estudantil, nas pessoas do professor Bruno, Mônica, Geórgia, Márcia e demais, pelos infindáveis momentos de acolhimento.

Agradeço a Residência Universitária a qual me acolheu e me ensinou ser mais humano e coletivo e ao meu irmão de quarto Marcelo Marques que sempre me acolheu com companheirismo.

Agradeço ainda a Mauro Castro, cuja contribuição foi essencial para a logística e viabilização das atividades de campo, atuando na intermediação do acesso às áreas estudadas junto aos empresários da região, o que possibilitou a execução adequada das etapas de campo.

Agradeço aos colegas de curso, Armando Viana, Almir Bezerra, Natália Lacerda, Gutemberg Melgaço, Jordan Elias, Aldo Wagna, Marcos Lima, Guilherme Irineu, e aos demais por sempre me apoiarem nessa árdua trajetória.

Agradecer aos meus amigos australianos Caio Francisco e Annie Lobwein pelas aulas de inglês, apoio e motivação.

Por fim, agradeço a todos os professores do Departamento de Geologia, que contribuíram de maneira significativa para minha formação acadêmica, assim como a todos os funcionários do DEGEO, pelo apoio, respeito e pela construção de um ambiente harmonioso e favorável ao aprendizado e ao crescimento profissional.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo investigar o potencial de ocorrência de elementos terras raras (ETRs) em diferentes unidades geológicas localizadas no sudeste do estado do Ceará e no extremo oeste dos estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba. O estudo baseou-se em planejamento prévio com análise cartográfica e interpretação de anomalias geofísicas de tório (Th), seguido por atividades de campo realizadas em etapa única, com amostragem sistemática de rochas, rochas alteradas e solos autóctones. As amostras foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectrometria de Energia Dispersiva (MEV-EDS), com foco na fração granulométrica inferior a 0,125 mm. Os resultados indicaram que os augen gnaiesses da Suíte Serra do Deserto apresentam os maiores enriquecimentos em ETRs, com registros de ítrio (Y), lantânio (La), neodímio (Nd), cério (Ce) e háfnio (Hf), associados principalmente a minerais acessórios resistentes ao intemperismo. Nas suítes São Miguel, Dr. Severiano e no Plúton Poço Dantas não foram identificadas anomalias significativas de ETRs, embora tenham sido detectados enriquecimentos pontuais de bário e estanho, este último associado a partículas concentradas em ambientes hidrotermais. Conclui-se que a integração entre dados geofísicos, amostragem multiescalar e análises por MEV-EDS mostrou-se eficaz na identificação de áreas favoráveis à concentração de ETRs, destacando-se a Suíte Serra do Deserto como a unidade de maior potencial.

Palavras-chave: Elementos Terras Raras; MEV-EDS; Geologia Regional.

ABSTRACT

This study aimed to investigate the potential occurrence of rare earth elements (REEs) in different geological units located in the southeastern portion of the state of Ceará and in the westernmost areas of the states of Rio Grande do Norte and Paraíba, Brazil. The research was based on prior planning involving cartographic analysis and interpretation of thorium (Th) geophysical anomalies, followed by fieldwork carried out in a single campaign with systematic sampling of rocks, altered rocks, and autochthonous soils. The samples were analyzed using Scanning Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive Spectrometry (SEM–EDS), with emphasis on the granulometric fraction smaller than 0.125 mm. The results indicate that the augen gneisses of the Serra do Deserto Suite show the most significant REE enrichments, with the detection of yttrium (Y), lanthanum (La), neodymium (Nd), cerium (Ce), and hafnium (Hf), mainly associated with accessory minerals resistant to weathering. No significant REE anomalies were identified in the São Miguel Suite, Dr. Severiano Suite, or the Poço Dantas Pluton; however, localized enrichments of barium and tin were detected, the latter associated with hydrothermal environments. It is concluded that the integration of geophysical data, multiscale sampling, and SEM–EDS analyses proved effective in identifying areas favorable to REE concentration, highlighting the Serra do Deserto Suite as the unit with the greatest potential.

Keywords: Rare Earth Elements; SEM–EDS; Regional Geology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de das vias e acesso para área de estudo.....	19
Figura 2 – Mapa Geomorfológico da região estudada.....	21
Figura 3 – Mapa pedológico regional das áreas estudadas.....	22
Figura 4 – Tabela periódica com destaque dos ETR.....	25
Figura 5 – Distribuição da demanda global dos ETR em 2020, com previsão para 2030, por aplicação.....	28
Figura 6 – Metasiltito da região Orós e quartzito da região Orós, respectivamente.....	45
Figura 7 – Faixa Orós-Jaguaribe.....	46
Figura 8 – Região do Plúton Pereiro.....	49
Figura 9 – Valores obtidos EDS em óxidos para solo do augen gnaïsse, fração <0,125mm, Ponto 1.	73
Figura 10 – Valores obtidos EDS em óxidos para solo do augen gnaïsse, fração <0,125mm, Ponto 37.	74
Figura 11 – Valores obtidos EDS em óxidos para solo do augen gnaïsse, fração < 0,125mm, Ponto 39.	75
Figura 12 – Valores obtidos EDS em óxidos para solo da Suíte São Miguel, fração < 0,125mm, Ponto 26.	77
Figura 13 – Valores obtidos EDS em óxidos para solo da Suíte São Miguel, fração < 0,125mm, Ponto 36.	78
Figura 14 – Valores obtidos EDS em óxidos para solo dos dioritos Dr. Sveriano, fração < 0,125mm, Ponto 28.	79
Figura 15 – Valores obtidos EDS em óxidos para solo do diorito Dr. Severiano, fração < 0,125mm, Ponto 34.	80
Figura 16 – Valores obtidos EDS em óxidos para diorito Poço Dantas epidotizado, Ponto 41.....	82
Figura 17 – Valores obtidos EDS em óxidos para solo do diorito Poço Dantas epidotizado, Ponto 42.....	83
Figura 18 – <i>Boxplot</i> dos óxidos – amostra PO1.....	87
Figura 19 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos da amostra AM P01.....	88
Figura 20 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos da amostra AM P26.....	91

Figura 21 – Boxplot dos óxidos – amostra P28.....	94
Figura 22 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos da amostra AM P28.....	95
Figura 23 – <i>Boxplot</i> dos óxidos – amostra P34.....	98
Figura 24 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos de amostra AM P34.....	99
Figura 25 – Boxplot dos óxidos – amostra P36.....	103
Figura 26 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos da amostra AM P36.....	104
Figura 27 – Boxplot dos óxidos – amostra P37.....	107
Figura 28 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos da amostra AM P37.....	109
Figura 29 – Boxplot dos óxidos – amostra P39.....	112
Figura 30 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos da amostra AM P39.....	113
Figura 31 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos da amostra AM P41.....	115
Figura 32 – Boxplot dos óxidos – amostra P42.....	119
Figura 33 – <i>Heatmap</i> das concentrações de óxidos da amostra AM P42.....	120
Figura 34 – Mapa de Aerogamaespectrometria.....	122

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Processo de quarteamento das amostras.....	40
Fotografia 2 – Laboratório de preparação de amostra.....	41
Fotografia 3 – MEV-EDS Laboratório de Microscopia Degeo-UFC.....	42
Fotografia 4 – Ponto 1, augen gnaisse Suite Serra do Deserto, mostrando orientação de fenocristais de K-F.....	47
Fotografia 5 – Suíte São Miguel.....	51
Fotografia 6 – Suite Dr Severiano, dioritos e gabros.....	54
Fotografia 7 – Faixa Orós-Jaguaribe.....	57
Fotografia 8 – Arenito com clastos de quartzo e feldspato de tamanhos centimétricos.....	59
Fotografia 9 – Textura de augen gnaisse (Suite Serra do Deserto, ponto 37)...	62
Fotografia 10 – A) Ponto 1: Augen gnaisse (Suíte Serra do Deserto) e B) Ponto 38 Augen gnaisse alterado amostrado para solo.....	63
Fotografia 11 – Amostragem de solo raso no ponto 37.....	64
Fotografia 12 – A) Solo proveniente da alteração do Granito porfirítico, Suite São Miguel (Ponto 34) e B) rocha exibindo fáceis grosseira com fenocristais de k-f e veios tardios de granito equigranular fino.....	66
Fotografia 13 – Dioritos Dr Severiano na cidade de Dr. Severiano.....	68
Fotografia 14 – Amostragem de solo Suite Dr. Severiano (dioritos), solo raso de coloração esverdeado e fino (ponto 34).....	69
Fotografia 15 – A) Diorito Poço Dantas (Ponto 41) com forte epidotização, B) Perfil do solo do Ponto 42, camada superficla vermelho latossolo e camada verde abaixo litossolo dos dioritos Pluton Poço Dantas, local com forte epidotização.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Média, desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P01.....	85
Tabela 2 –	Média, desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P26.....	90
Tabela 3 –	Média, desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P28.....	93
Tabela 4 –	Média, desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P34.....	97
Tabela 5 –	Média, desvio padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P36.....	102
Tabela 6 –	Média, desvio-padrão (SD) coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P37.....	105
Tabela 7 –	Média, desvio-padrão (SD) coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P39.....	110
Tabela 8 –	Média, desvio-padrão (SD) coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P39.....	114
Tabela 9 –	Média, desvio-padrão (SD) coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P42.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
CV	Coeficiente de Variação
DEGEO	Departamento de Geologia
ETR's	Elementos Terras Raras
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
LGMA	Laboratório de Geologia Marinha Aplicada
LME	Laboratório de Microscopia eletrônica
MET	Microscópio Eletrônico de Transmissão
MEV-EDS	Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectrometria de Energia Dispersiva
MO	Microscópio Óptico
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
SIBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SGB	Serviço Geológico do Brasil
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	Justificativa	18
1.3	Localização e vias de acesso aos afloramentos	19
1.4	Aspectos Fisiográficos	20
1.4.1	Geomorfologia	20
1.4.2	Pedologia	21
1.4.3	Hidrografia	22
1.4.4	Clima	23
2	METODOLOGIA DE ESTUDO	25
2.1	Revisão Bibliográfica	25
2.1.1	Definição dos elementos de terras raras (ETR)	25
2.1.2	Início da exploração dos ETR e sua aplicação na contemporaneidade	26
2.1.3	Classificação dos Solos	29
2.1.4	Aeromagnetometria	30
2.1.5	Aerogamaespectromia	31
2.1.6	Média Aritmética	33
2.1.7	Medidas de Dispersão e Desvio Padrão	33
2.1.8	Coeficiente de Variação	34
2.1.9	Boxplot	35
2.1.10	Heatmap	36
2.2	Etapas de Campo	37
2.3	Etapas de Laboratório	38
2.3.1	Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV-EDS)	38
2.3.2	Processamento das amostras	39

3	GEOLOGIA REGIONAL.....	44
3.1	Faixa Óros-Jaguaribe.....	44
3.2	Batólito Pereiro/São Miguel: Suíte São Miguel, Suíte Dr. Severiano	48
3.2.1	<i>Suíte São Miguel.....</i>	50
3.2.2	<i>Suíte Dr. Severiano.....</i>	53
3.2.2.1	<i>Dioritos Dr. Severiano.....</i>	53
3.2.2.2	<i>Plúton Poço Dantas.....</i>	56
3.3	Bacia de Coronel João Pessoa.....	58
4	GEOLOGIA LOCAL.....	61
4.1	Formação Suíte Serra do Deserto, Faixa Jaguaribe (Pontos 1, 5, 37,38,39).....	61
4.1.1	<i>Petrografia.....</i>	61
4.1.2	<i>Descrição de campo e amostragem.....</i>	63
4.1.2.1	<i>Ponto 1, 5, 37, 38, 39: Unidade Geológica - Suíte Serra do Deserto....</i>	63
4.1.2.2	<i>Batólito Pereiro/São Miguel (Pontos 10, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 36, 35)</i>	64
4.1.2.3	<i>Suíte Dr. Severiano (Pontos 29, 30, 31, 32, 33, 40, 11).....</i>	66
4.1.2.4	<i>Dioritos Pluton Poço Danta (Pontos 41, 42, 43, 44)).....</i>	69
5	RESULTADOS.....	72
5.1	Augen Gnaiss Serra do Deserto.....	72
5.2	Suíte São Miguel.....	76
5.3	Suíte Dr. Severiano (Dioritos Dr. Severiano)).....	79
5.4	Diorito Pluton Poço Dantas.....	81
5.5	Resultados correspondentes às frações peneiras ASTM 120 e ASTM 80.....	84
5.5.1	<i>Amostra AM P01.....</i>	85
5.5.2	<i>Amostra AM P26.....</i>	89
5.5.3	<i>Amostra AM P28.....</i>	92
5.5.4	<i>Amostra AM P34.....</i>	96
5.5.5	<i>Amostra AM P36.....</i>	100
5.5.6	<i>Amostra AM P37.....</i>	104

5.5.7	<i>Amostra AM P39</i>	109
5.5.8	<i>Amostra AM P41</i>	113
5.5.9	<i>Amostra AM P42</i>	116
5.6	Síntese geral das análises.....	121
5.7	Resultados sobre a Geofísica do local de estudo	122
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
	REFERÊNCIAS.....	126
	ANEXOS.....	134
	Anexo 1 – Mapa Geológico.....	134
	Anexo 2 – Mapa de Solos.....	135
	Anexo 3 – Tabelas MEV-EDS – ASTM80.....	136
	Anexo 4 – Tabelas MEV-EDS – ASTM120.....	137
	Anexo 5 – Tabela Pontos visitados.....	148
	Anexo 6 – Tabela dos Pontos onde foram coletadas amostras do solo e rocha encaminhados para análise MEV-EDS.....	150
	Anexo 7 – Análises do material passante das peneiras ASTM80 e ASTM120 no MEV-EDS.....	151

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa científica sobre os Elementos Terras Raras (ETRs) teve início no final do século XVIII, a partir da identificação de minerais incomuns em regiões da Escandinávia, especialmente na Suécia. A descoberta de substâncias como a cerita e a gadolinita revelou um conjunto de óxidos metálicos com propriedades químicas extremamente semelhantes, cuja separação se mostrou tecnicamente complexa. Ao longo do século XIX, sucessivos avanços analíticos permitiram o isolamento gradual dos lantanídeos, bem como do escândio e do ítrio, consolidando a compreensão de que esses elementos não eram, propriamente, raros em termos de abundância natural, mas sim difíceis de serem individualizados e purificados.

No decorrer do século XX, especialmente após a identificação do promécio em 1947 a partir de produtos de fissão nuclear, os ETRs passaram a adquirir relevância crescente para aplicações industriais e tecnológicas. Inicialmente associados à extração de tório e urânio em minerais como a monazita, esses elementos ganharam destaque estratégico com o avanço da eletrônica, da indústria de iluminação e, posteriormente, das tecnologias de comunicação, defesa e energia.

A utilização de európio em televisores coloridos, o emprego de neodímio em ímãs permanentes de alta potência e a incorporação de diversos lantanídeos em lasers, catalisadores e dispositivos eletrônicos ilustram a centralidade desses materiais na economia tecnológica contemporânea.

Atualmente, o interesse global pelos elementos terras raras é intensificado tanto pela ampliação de suas aplicações quanto por questões geopolíticas e econômicas. A concentração da cadeia produtiva em poucos países, com destaque para a liderança chinesa no beneficiamento e refino, tem gerado preocupações estratégicas no Ocidente, estimulando políticas de diversificação de fontes e desenvolvimento tecnológico.

Nesse contexto, o Brasil desponta como um país com elevado potencial geológico, possuindo ocorrências significativas em estados como Minas Gerais, Goiás, Bahia, Amazonas e Sergipe, associadas a diferentes ambientes geológicos, como pegmatitos, rochas ultrabásicas, granitóides e complexos metamórficos com intenso hidrotermalismo. Apesar desse potencial, a exploração nacional ainda se concentra majoritariamente na exportação de minério bruto, evidenciando o desafio

de estruturar uma cadeia produtiva integrada e de maior valor agregado, capaz de transformar recursos naturais em protagonismo tecnológico e industrial.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia para prospecção de ETR.

1.1.2 Objetivos específicos

- Testar diferentes solos e granulometria;
- Comparar com anomalias gamaespectométricas;
- Testar leituras geoquímicas no MEV-EDS.

1.2 Justificativa

A justificativa para a escolha desta temática fundamenta-se na análise de dados bibliográficos que indicam a presença de minerais portadores de ETRs em rochas da região investigada, com potenciais teores economicamente relevantes. Diversos trabalhos científicos apontam a ocorrência desses elementos em diferentes contextos geológicos, evidenciando a necessidade de estudos sistemáticos que permitam confirmar, quantificar e caracterizar tais ocorrências de forma mais precisa.

Além disso, a crescente demanda global por ETRs, impulsionada pelo avanço de tecnologias estratégicas nos setores de energia, eletrônica, mobilidade elétrica e defesa, reforça a importância do desenvolvimento de metodologias confiáveis para a amostragem, preparação e análise laboratorial desses elementos. Nesse sentido, a proposição de procedimentos técnicos adequados para a coleta e medição de ETRs contribui não apenas para o aprimoramento do conhecimento geológico regional, mas também para a avaliação preliminar do potencial mineral da área estudada.

Diante disso, o presente trabalho justifica-se pela relevância científica e tecnológica de estabelecer uma metodologia aplicada à identificação e quantificação de ETRs em rochas, fornecendo subsídios para futuras pesquisas, prospecções minerais e para o planejamento de estratégias voltadas ao aproveitamento racional desses recursos, em consonância com as demandas atuais do mercado e com o desenvolvimento sustentável da atividade mineral.

1.4 Aspectos Fisiográficos

A área de estudo engloba os municípios de Icó, localizado na Região Centro-Sul, bem como Jaguaribe e Pereiro, no estado do Ceará. Abrange, ainda, os municípios de Água Nova, Coronel João Pessoa, Doutor Severiano, Encanto, Luís Gomes, Riacho de Santana e São Miguel, situados na região do Alto Oeste do estado do Rio Grande do Norte, além do município de Poço Dantas, no estado da Paraíba.

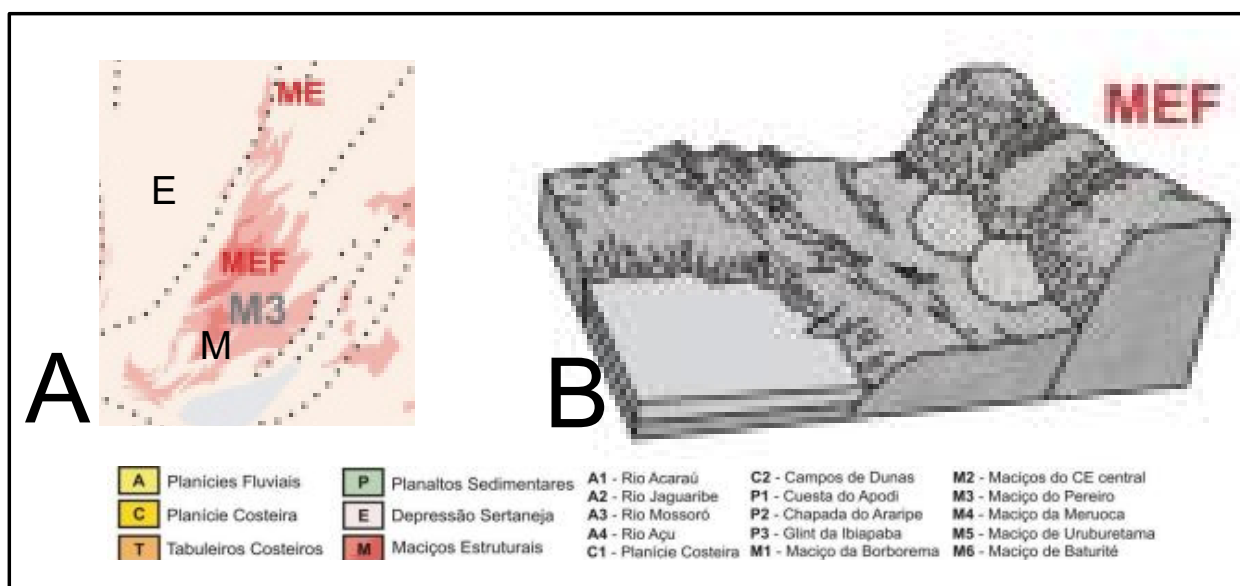
1.4.1 Geomorfologia

Geomorfologicamente destacam-se três feições regionais (Figura 2). A primeira é a Serra de Pereiro–São Miguel constitui o principal desnível topográfico da região estudada. Essa unidade geomorfológica está associada ao Batólito Pereiro–São Miguel, caracterizado por uma intrusão granítica que se destaca no relevo em função da erosão diferencial, quando comparada às rochas encaixantes. A unidade também corresponde à Superfície Sul-Americana, apresentando condições microclimáticas específicas e um horizonte pedológico espesso, com perfis de solos que podem ultrapassar 10 m de espessura.

Outra feição geomorfológica de relevância é a Depressão Neocomiana da Bacia de Coronel João Pessoa. Essa unidade corresponde a um graben tectônico, caracterizado por um desnível topográfico da ordem de aproximadamente 100 m, evidenciando a influência estrutural no modelado do relevo regional.

Destaca-se, ainda, a Superfície Velha ou Superfície Paraguaçu, correspondente à Depressão Sertaneja. Essa unidade geomorfológica abriga as rochas paleoproterozoicas que atuam como encaixantes do Batólito Pereiro–São Miguel. O relevo é marcado por cristas alinhadas predominantemente na direção norte–sul, formando colinas alongadas e pontiagudas, desenvolvidas principalmente sobre *augen gnaisses* pertencentes à Suíte Serra do Deserto (Rabelo *et al.*, 2022).

Figura 2 - Mapa Geomorfológico da região estudada



Fonte: Maia e Bezerra (2014).

Legenda: A: Mapa Geomorfológico da região de Jaguaribe, Pereiro e São Miguel. B: modelo geomorfológico para região estudada. E: Depressão sertaneja. M: Maçiços Estruturais.

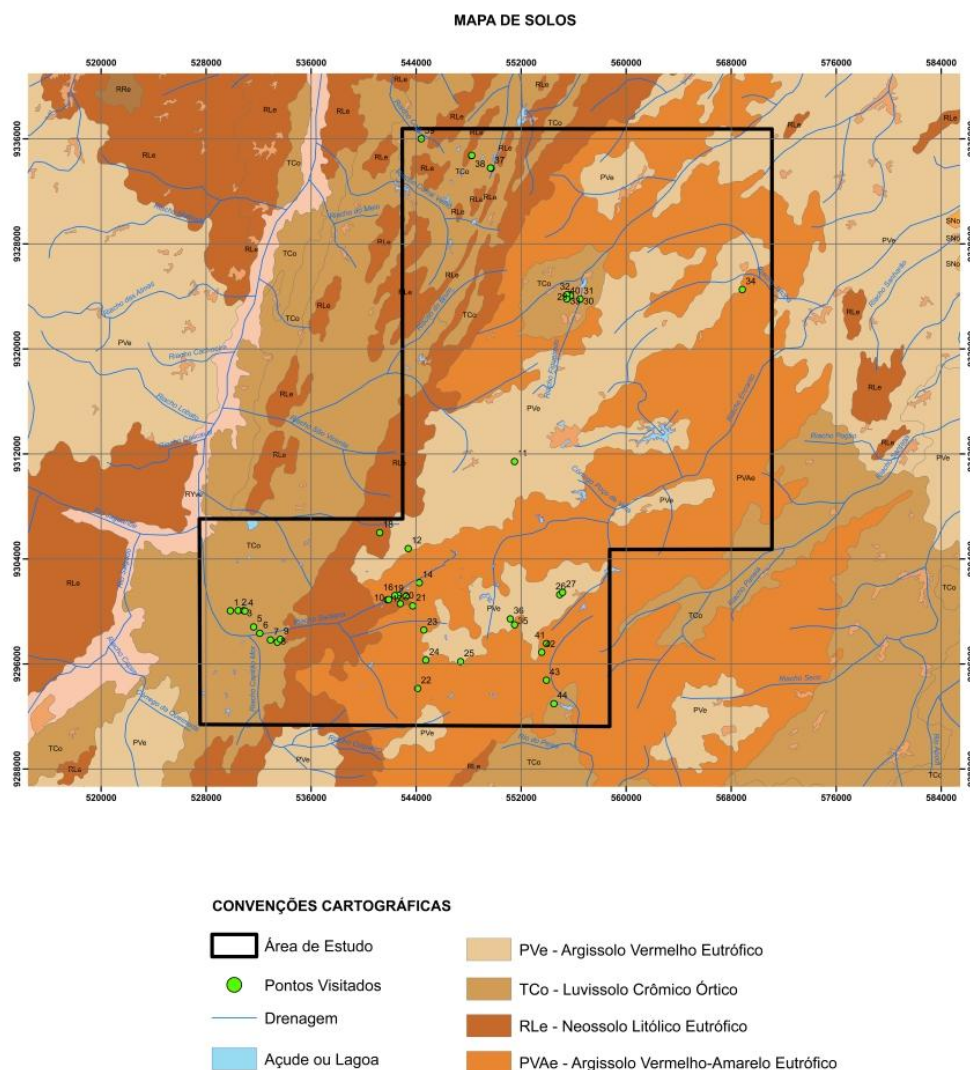
1.4.2 Pedologia

No estudo desenvolvido por Almeida e Medeiros (2021), voltado à análise das formas de uso e ocupação do solo nos planaltos residuais do extremo oeste potiguar, identificou a ocorrência de distintas classes de solos na região, dentre as quais se destacam o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, o Luvisolo e o Neossolo Litólico Eutrófico. Observa-se a predominância do Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, especialmente no município de São Miguel.

De acordo com Santos *et al.* (2021), o Argissolo Vermelho-Amarelo caracteriza-se pela presença de um horizonte subsuperficial de acumulação de argila, denominado horizonte B textural (Bt), resultante de processos pedogenéticos de iluviação. Esse horizonte apresenta coloração vermelho-amarelada, atribuída à presença combinada dos óxidos de ferro hematita e goethita. No que se refere às propriedades químicas, esse tipo de solo apresenta fertilidade natural variando de baixa a muito baixa, o que impõe limitações ao uso agrícola sem práticas adequadas de manejo e correção.

Assim, o mapa pedológico das áreas estudadas está demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Mapa pedológico regional das áreas estudadas



Fonte: Maia e Bezerra (2014).

1.4.3 Hidrografia

No contexto hidrográfico regional, destaca-se o vale do rio Jaguaribe, que constitui o principal sistema de drenagem da área de estudo. O curso do rio encontra-se estruturalmente controlado pela Zona de Cisalhamento Jaguaribe, ao longo da qual o vale se apresenta encaixado. Parte significativa da área investigada insere-se no trecho denominado Médio Jaguaribe, caracterizado por drenagem sazonal e forte influência do regime climático semiárido (Agência Nacional das Águas, 2012).

Na Serra de Pereiro, em São Miguel, predominam drenagens intermitentes de pequeno porte, condicionadas pela topografia elevada e pelo regime irregular de

chuvas. Esses cursos d'água apresentam caráter temporário, com escoamento concentrado nos períodos chuvosos. Destacam-se, nesse contexto, o açude do Bonito e outros reservatórios de menor porte localizados no município de São Miguel, que desempenham papel fundamental no armazenamento hídrico e no abastecimento local (Embrapa, 2012).

1.4.4 Clima

O clima da região serrana de Pereiro–São Miguel enquadra-se no domínio do semiárido nordestino, apresentando, contudo, particularidades associadas à altitude e à configuração do relevo. De modo geral, caracteriza-se por temperaturas elevadas ao longo do ano, com verões quentes e secos e um período chuvoso relativamente concentrado, embora marcado por elevada irregularidade espacial e temporal das precipitações, como destaca o Instituto Nacional do Semiárido – INSA (2025).

As chuvas ocorrem predominantemente entre os meses de fevereiro e maio, sob a forma de eventos de fraca a moderada intensidade, podendo alternar-se com períodos de estiagem prolongada (INSA, 2025). Em função da altitude da serra, observa-se a formação de microclimas locais, com médias térmicas ligeiramente inferiores às das áreas adjacentes, como Pau dos Ferros, a leste, e Jaguaribe, a oeste (Ministério de Minas e Energia, 2005).

As temperaturas diurnas frequentemente superam os 30°C, enquanto as noites tendem a ser mais amenas. A umidade relativa do ar é, em geral, baixa, e o céu apresenta predomínio de condições de pouca nebulosidade, com aumento temporário de nuvens durante episódios de instabilidade atmosférica (Clima Tempo, 2025).

Já o clima da Depressão Sertaneja, no Vale do Jaguaribe, é tipicamente quente e seco, com temperaturas elevadas durante a maior parte do ano e baixos índices de umidade relativa do ar, sobretudo nos meses mais quentes. As máximas térmicas podem atingir valores próximos ou superiores a 39 °C, sendo comuns períodos com umidade relativa entre 20% e 30%, o que potencializa o desconforto térmico e os riscos à saúde, como destaca o relatório da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará – SEMACE (2016).

A região é frequentemente afetada por ondas de calor e longos períodos de estiagem, monitorados por instituições como a FUNCEME e o INMET, que emitem alertas relacionados à baixa umidade e às condições extremas de temperatura. As

precipitações são escassas e irregulares, ocorrendo, de forma pontual, chuvas fracas e passageiras, geralmente no final da tarde ou à noite, associadas a fatores atmosféricos locais, como brisas e instabilidades convectivas. Essas características reforçam a elevada vulnerabilidade climática da região e sua dependência de reservatórios artificiais para a segurança hídrica (SEMACE, 2016).

2 METODOLOGIA DE ESTUDO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Definição dos elementos de terras raras (ETR)

As terras raras constituem uma família de elementos com propriedades físicas e químicas bastante semelhantes, o que historicamente dificultou sua separação e purificação. De acordo com Gschneidner e Capellen (1987), esse desafio técnico exigiu extensos esforços laboratoriais para a obtenção de espécies relativamente puras, o que contribuiu para que esses elementos permanecessem pouco explorados por um longo período, assim, somente em 1907 é que praticamente todas as terras raras naturais passaram a ser conhecidas.

Os 17 elementos de ETR são tradicionalmente subdivididos em três subgrupos, de acordo com sua densidade: elementos leves, sendo esses lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd) e promécio (Pm); elementos médios, a saber samário (Sm), európio (Eu) e gadolínio (Gd); e elementos pesados, a saber térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), escândio (Sc), túlio (Tm), itérbio (Yb), lutécio (Lu) e ítrio (Y) (Lima, 2013) (Figura 4).

Figura 4 – Tabela periódica com destaque dos ETR

H																		He															
Li	Be										B	C	N	O	F	Ne																	
Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar																	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo																
Lantanídeos																																	
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>La</td> <td>Ce</td> <td>Pr</td> <td>Nd</td> <td>Pm</td> <td>Sm</td> <td>Eu</td> <td>Gd</td> <td>Tb</td> <td>Dy</td> <td>Ho</td> <td>Er</td> <td>Tm</td> <td>Yb</td> <td>Lu</td> </tr> </tbody> </table>																			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																			

Fonte: Morato (2019).

Esses elementos ocorrem em concentrações economicamente viáveis principalmente nos minerais monazita $(\text{ETR})\text{PO}_4$, bastnaesita $[\text{ETR}(\text{CO}_3)]\text{F}$, xenotima

(ETR)PO₄ e em argilas lateríticas. As argilas e a xenotima constituem as principais fontes de ETR pesados, enquanto a monazita e a bastnaesita são predominantemente fontes de terras raras leves (Amorim, 2022).

Do ponto de vista físico-químico, as terras raras caracterizam-se por serem dúcteis, maleáveis, de baixa dureza, altamente magnetizáveis e bons condutores de calor e eletricidade. Tais propriedades conferem a esses elementos um papel estratégico como matéria-prima para indústrias de alta tecnologia, sendo amplamente utilizados na produção de materiais luminescentes, ímãs permanentes, dopantes em tubos de raios catódicos para televisores e computadores, além da composição de catalisadores (Lima, 2013; Castellano, 2025).

2.1.2 Início da exploração dos ETR e sua aplicação na contemporaneidade

Sinha (1966) traz que o primeiro elemento do grupo das terras raras a ser identificado foi o cério, em 1751. Essa descoberta é atribuída ao mineralogista suíço A. F. Cronstedt, que obteve um mineral pesado denominado cerita. No entanto, há controvérsias na literatura quanto a esse marco histórico, sendo frequentemente apontado o ano de 1787 como o verdadeiro início da história das terras raras. Nesse período, Carl Axel Arrhenius encontrou um mineral escuro, conhecido como iterbita, posteriormente denominado gadolinita, na pequena vila de Ytterby, próxima a Estocolmo, local que viria a dar origem ao nome de vários elementos desse grupo (Sousa Filho; Galaço; Serra, 2019).

A industrialização das terras raras teve início com a fabricação de camisas incandescentes para lâmpadas. Com o avanço do conhecimento científico e tecnológico, as propriedades desses elementos tornaram-se mais bem compreendidas, ampliando significativamente seu campo de aplicação. Seus compostos passaram a ser empregados na produção de *mischmetal* para pedras de isqueiro, em baterias recarregáveis e em diversas aplicações metalúrgicas, consolidando sua importância industrial ao longo do século XX (Sousa Filho; Galaço; Serra, 2019; Santos, 2025).

Ademais, Santos e Panossian (2017) afirmam que os ETR possuem grande relevância geológica, tanto na datação de minerais, por meio da razão samário-neodímio, quanto na investigação da origem de magmas, a partir da análise da distribuição desses elementos em rochas ígneas. Historicamente, o Brasil destacou-

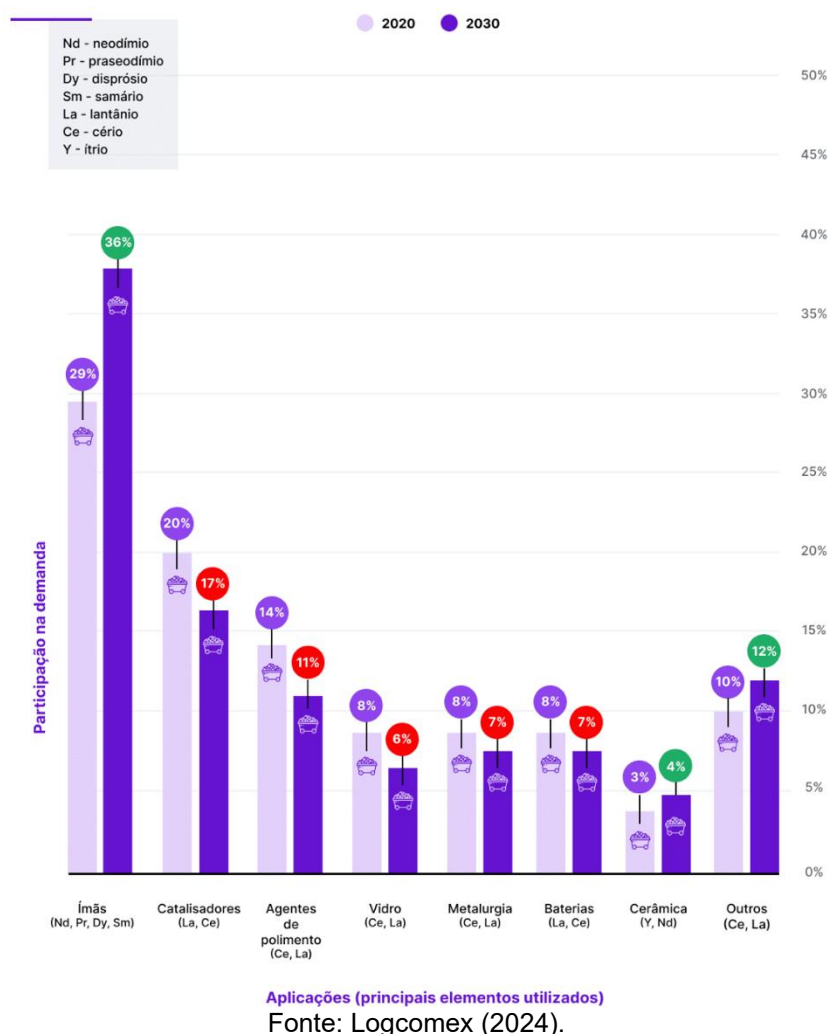
se como o primeiro grande fornecedor mundial de terras raras. A partir de 1886, iniciou-se a exploração de areias monazíticas localizadas nas praias de Cumuruxatiba, no estado da Bahia, com o objetivo de atender à demanda pela produção de mantas incandescentes. Até 1915, o país ocupou a posição de maior produtor mundial de ETR, alternando posteriormente essa liderança com a Índia ao longo de aproximadamente 45 anos (Takehara; Silveira, 2014).

Atualmente, o Brasil detém a segunda maior reserva de ETR do mundo, com cerca de 21 milhões de toneladas estimadas, o que representa 23% do recurso global, segundo o Serviço Geológico do Brasil - SGB (2025). A China ocupa posição hegemônica no cenário global dos elementos terras raras, não apenas em relação aos volumes de reservas e produção, mas, sobretudo, no domínio tecnológico dos processos de separação e refino necessários à obtenção de óxidos de alta pureza, conhecidos internacionalmente como *Rare Earth Oxides* (REO). Esse controle da etapa de maior valor agregado da cadeia produtiva confere ao país significativa vantagem estratégica no mercado internacional (SGB, 2025).

Diante disso, Lima (2013) cita que os elementos terras raras assumem papel estratégico na sociedade contemporânea em razão de sua ampla aplicação em produtos comerciais e tecnologias avançadas. Esses elementos estão presentes em diversos setores, incluindo a indústria automotiva, o refino de petróleo, a produção de fósforos para telas de televisores, monitores e computadores portáteis, além de ímãs permanentes, baterias recarregáveis para veículos híbridos e elétricos e equipamentos médicos de alta precisão. Destaca-se, ainda, o uso de ímãs permanentes contendo neodímio, gadolínio, disprósio e itérbio em componentes elétricos e eletrônicos, bem como em geradores modernos utilizados em turbinas eólicas.

Sua distribuição em demanda global, com previsão para 2023, está ilustrada na Figura 5:

Figura 5 – Distribuição da demanda global dos ETR em 2020, com previsão para 2030, por aplicação



É importante destacar que, no setor de defesa, as terras raras possuem relevância ainda maior, sendo empregadas em sistemas militares de alta complexidade, como aeronaves de combate, sistemas de controle e guiagem de mísseis, defesa antimísseis, satélites e sistemas de comunicação. Lima (2013) ressalta a importância dos ímãs permanentes à base de samário-cobalto (SmCo) e neodímio-ferro-boro (NdFeB), amplamente utilizados nessas aplicações. Os ímãs NdFeB destacam-se por apresentarem a maior força magnética conhecida entre os ímãs permanentes, sendo essenciais para armamentos modernos, enquanto os ímãs SmCo mantêm elevada estabilidade magnética em altas temperaturas, o que os torna ideais para tecnologias militares como mísseis guiados de precisão, bombas inteligentes e aeronaves (Lima, 2013).

No contexto brasileiro, estudos e diretrizes institucionais indicam que o fortalecimento de parcerias entre o SGB, instituições científicas e tecnológicas (ICTs) e o setor privado constitui um caminho fundamental para o desenvolvimento de tecnologias próprias, capazes de converter recursos geológicos estimados em depósitos minerais devidamente medidos e economicamente viáveis (SGB, 2025).

Ademais, levantamentos conduzidos pelo SGB (2025), pela Agência Nacional de Mineração (ANM) e por estudos técnicos consolidados apontam que a maior parte dos recursos medidos de elementos terras raras no Brasil encontra-se concentrada, principalmente, nos estados de Minas Gerais, Goiás, Amazonas, Bahia e Sergipe, os quais reúnem os principais tipos de depósitos com potencial econômico para esses elementos.

2.1.3 Classificação dos Solos

Os solos identificados na área de estudo abrangem diferentes classes pedológicas, cuja distribuição está fortemente condicionada ao relevo, ao material de origem e aos processos pedogenéticos atuantes. De modo geral, predominam solos rasos a moderadamente profundos, frequentemente associados a áreas com declividade acentuada e proximidade do substrato rochoso.

Os **Neossolos Litólicos Eutróficos** correspondem a solos rasos, nos quais a soma dos horizontes desenvolvidos sobre a rocha raramente ultrapassa 50 cm de espessura. Esses solos estão, em sua maioria, associados a relevos mais declivosos, apresentando como principais limitações ao uso agrícola a reduzida profundidade efetiva, a presença da rocha próxima à superfície e a suscetibilidade à erosão (Santos *et al.*, 2021). De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), essa classe caracteriza-se por saturação por bases igual ou superior a 50% na maior parte dos horizontes situados até 50 cm de profundidade, conferindo-lhes caráter eutrófico (Santos *et al.*, 2018).

Os **Argissolos Vermelhos Eutróficos** são definidos pela presença de um horizonte diagnóstico B textural, resultante do acúmulo de argila em subsuperfície, decorrente da mobilização e perda desse material nos horizontes superficiais do solo (Zaroni, 2021). A condição eutrófica desses solos é expressa por saturação por bases $\geq 50\%$ na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, incluindo o horizonte BA, o que lhes confere fertilidade natural moderada a elevada (Santos *et al.*, 2018). Esses

solos apresentam bom potencial para uso agrícola, desde que adotadas práticas adequadas de manejo e conservação.

Os **Luvissolos Crômicos Órticos** compreendem solos minerais não hidromórficos, caracterizados pela presença de horizonte B textural imediatamente abaixo do horizonte A ou E, com argila de atividade alta e elevada saturação por bases (Santos *et al.*, 2018). Segundo Almeida *et al.* (2021), esses solos apresentam coloração intensa, geralmente variando entre tons vermelhos e amarelos, além de caráter eutrófico nos horizontes subsuperficiais, o que favorece o desenvolvimento radicular em maiores profundidades. Contudo, podem apresentar limitações relacionadas à susceptibilidade à erosão, especialmente em áreas de relevo ondulado a forte ondulado.

Por fim, os **Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos** apresentam ampla distribuição no território brasileiro, ocorrendo desde a Região Norte até o Sul do país, constituindo uma das classes de solos mais extensas do Brasil, ao lado dos Latossolos (Santos *et al.*, 2018). Essa classe também é caracterizada pela presença de horizonte B textural e por saturação por bases $\geq 50\%$ na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, incluindo o horizonte BA. A condição eutrófica resulta em fertilidade natural moderada a boa, quando comparada aos Argissolos distróficos, tornando esses solos relativamente favoráveis ao uso agrícola, desde que respeitadas suas limitações físicas e adotadas práticas conservacionistas adequadas.

2.1.4 Aeromagnetometria

A aeromagnetometria configura-se como uma técnica de aquisição de dados geofísicos realizada por meio de plataformas aéreas, como aviões ou helicópteros, sendo amplamente empregada para o mapeamento de grandes áreas em curtos intervalos de tempo. Assim como no levantamento terrestre, o método fundamenta-se na medição das variações do campo magnético terrestre resultantes da distribuição de minerais magnéticos na crosta. Contudo, a aeromagnetometria oferece a vantagem de sobrevoar terrenos de difícil acesso geográfico, permitindo uma cobertura contínua e sistemática que seria inviável por métodos convencionais de superfície (Telford *et al.*, 1990).

A instrumentação utilizada nesses levantamentos evoluiu significativamente, passando dos antigos magnetômetros de fluxo (fluxgate) para sensores de alta

sensibilidade, como os de vapor de césio ou potássio. Estes sensores são geralmente instalados em extensões da aeronave denominadas stingers, ou rebocados em compartimentos aerodinâmicos conhecidos como birds, com o objetivo de minimizar a interferência magnética gerada pelos próprios sistemas da aeronave. A integração de sistemas de posicionamento global (GPS) e altímetros de precisão é crucial, pois a intensidade da anomalia magnética é inversamente proporcional à distância entre o sensor e a fonte geológica (Zhdanov, 2021).

O planejamento de um levantamento aeromagnetométrico é definido por parâmetros como a altura de voo e o espaçamento entre as linhas de produção. De acordo com Dentith e Mudge (2014), a escolha da altitude é um compromisso entre a resolução espacial e a atenuação do sinal: voos a baixas altitudes (low-level) favorecem a detecção de fontes superficiais e de alta frequência, enquanto altitudes maiores tendem a suavizar ruídos locais, destacando estruturas regionais e profundas. Essa capacidade de filtrar visualmente diferentes níveis da crosta torna a aeromagnetometria uma ferramenta indispensável na fase de reconhecimento de projetos de exploração mineral e no zoneamento tectônico-estrutural (Telford et al., 1990).

Diferente dos levantamentos terrestres, os dados aeromagnetométricos exigem um processamento rigoroso para compensar as variações de atitude da aeronave (arfagem, guinada e rolagem) e os efeitos magnéticos induzidos pelo movimento do vetor metálico da plataforma. Uma vez corrigidos e nivelados, esses dados permitem a geração de mapas de contorno e imagens de pseudo-relevo que revelam a continuidade de cinturões supracrustais, a presença de intrusões ígneas e o traçado de grandes zonas de cisalhamento, muitas vezes ocultas sob coberturas sedimentares ou vegetação densa (Zhdanov, 2021).

2.1.5 Aerogamaespectromia

A aerogamaespectrometria é um método geofísico de sensoriamento remoto que se baseia na medição da radiação gama natural emitida pelos primeiros centímetros da crosta terrestre. Diferente dos métodos magnéticos, que medem campos de força, a gamaespectrometria é um método nuclear que detecta o fluxo de fótons provenientes da desintegração radioativa de isótopos instáveis. Na exploração geofísica e no mapeamento geológico, o foco recai sobre a detecção de três

radioelementos primários: Potássio (^{40}K), Urânio (^{238}U) e Tório (^{232}Th), cujas abundâncias e distribuições são indicadores diretos da composição litológica e de processos de alteração hidrotermal (IAEA, 2003).

A aquisição desses dados de forma aerotransportada exige a utilização de cristais detectores de iodeto de sódio dopados com tálio [$\text{NaI}(\text{Tl})$], que convertem a energia dos raios gama incidentes em pulsos luminosos e, posteriormente, em sinais elétricos. Devido à rápida atenuação da radiação gama pelo ar, os levantamentos aerogamaespectrométricos são realizados em altitudes relativamente baixas e constantes, tipicamente entre 80 e 120 metros. De acordo com a IAEA (2003), a eficácia do método depende da janela de observação do espectrômetro e da calibração rigorosa do sistema, garantindo que as contagens por segundo registradas sejam convertidas com precisão em concentrações de elementos na superfície (ppm para U e Th, e porcentagem para K).

O comportamento geoquímico distinto dos radioelementos permite que a aerogamaespectrometria seja utilizada na diferenciação de fácies ígneas e na identificação de zonas de cisalhamento. Enquanto o tório tende a ser mais estável e imóvel em ambientes superficiais, o potássio e o urânio são mais suscetíveis a processos de lixiviação e remobilização por fluidos hidrotermais. Essa distinção é fundamental para a exploração mineral, onde o enriquecimento anômalo de potássio ou a variação das razões entre os elementos (como $e\text{Th}/\text{K}$ ou $e\text{U}/\text{Th}$) podem sinalizar a presença de depósitos metálicos associados à alteração potássica (Dentith e Mudge, 2014; Zhdanov, 2021).

Para a finalidade de mapeamento geológico, os dados são frequentemente processados e apresentados na forma de mapas radiométricos ternários. Nestas representações, cada radioelemento é atribuído a uma cor primária (geralmente Vermelho para K, Verde para Th e Azul para U), e a composição resultante das cores revela variações composicionais sutis da geologia de superfície que poderiam não ser detectadas visualmente. Conforme destacado por Telford *et al.* (1990), o processamento desses dados deve considerar correções para a radiação de fundo (background), radiação cósmica e, crucialmente, para as variações de altitude e umidade do ar, a fim de garantir a integridade da assinatura geoquímica mapeada.

2.1.6 Média Aritmética

A média aritmética é uma das principais medidas de posição ou tendência central utilizadas em Estatística Descritiva, tendo como objetivo representar, por meio de um único valor, o comportamento médio de um conjunto de dados. De acordo com Morettin e Bussab, a média aritmética é definida como a soma de todas as observações dividida pelo número total de observações do conjunto de dados (Morettin; Bussab, 2010).

Formalmente, considerando um conjunto de n observações x_1, x_2, \dots uma variável quantitativa X , a média aritmética é dada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Apesar de amplamente utilizada, a média aritmética apresenta limitações importantes, sobretudo em distribuições assimétricas ou na presença de valores atípicos. Nessas situações, a média pode não representar adequadamente o centro dos dados, conduzindo a interpretações equivocadas (Morettin; Bussab, 2010). Ainda assim, quando a distribuição é aproximadamente simétrica, a média constitui uma medida eficiente e informativa do comportamento central dos dados.

2.1.7 Medidas de Dispersão e Desvio Padrão

A utilização isolada da média aritmética não fornece informações sobre a variabilidade dos dados. Conjuntos distintos podem apresentar a mesma média, mas comportamentos completamente diferentes quanto à dispersão. Por esse motivo, faz-se necessária a introdução de medidas de dispersão, que quantificam o grau de afastamento das observações em relação à média (Morettin; Bussab, 2010).

Entre as medidas de dispersão, destaca-se a variância, definida como a média dos quadrados dos desvios das observações em relação à média:

$$Var(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

No entanto, a variância apresenta uma limitação interpretativa relevante, pois sua unidade de medida é o quadrado da unidade original dos dados. Para contornar esse problema, utiliza-se o desvio padrão, definido como a raiz quadrada positiva da variância:

$$dp(X) = \sqrt{Var(X)}$$

O desvio padrão possui a mesma unidade de medida da variável analisada, o que facilita sua interpretação prática. Segundo Morettin e Bussab, (2010) tanto o desvio padrão quanto o desvio médio indicam, em média, o erro cometido ao substituir cada observação individual pela média do conjunto de dados.

Ademais, o desvio padrão é particularmente adequado quando os dados seguem, aproximadamente, uma distribuição normal. Em contextos com assimetrias acentuadas ou presença de valores extremos, medidas alternativas, como o desvio absoluto mediano, podem apresentar maior robustez (Morettin e Bussab, 2010).

2.1.8 Coeficiente de Variação

O coeficiente de variação (CV), também denominado desvio padrão relativo (*relative standard deviation* - RSD), é uma medida estatística de dispersão relativa definida como a razão entre o desvio padrão e a média. Por se tratar de uma medida adimensional, o coeficiente de variação é independente da magnitude dos dados e das unidades de medida utilizadas, sendo geralmente expresso em porcentagem (Rollinson, 1993).

De acordo com Rollinson (1993), o coeficiente de variação é particularmente adequado para comparar a variabilidade de conjuntos de dados medidos em diferentes unidades ou para comparar a dispersão relativa de variáveis cujas medianas apresentam valores bastante distintos. Essa característica torna o CV uma ferramenta amplamente utilizada em estudos geoquímicos, nos quais diferentes elementos químicos podem apresentar ordens de grandeza muito distintas.

Matematicamente, o coeficiente de variação é definido por:

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\%$$

Em que SD representa o desvio padrão dos dados e \bar{x} a média aritmética (Rollinson, 1993). Dessa forma, o CV fornece uma medida relativa da dispersão dos dados em torno da média, permitindo avaliar a variabilidade composicional de forma comparável entre diferentes elementos químicos ou conjuntos amostrais.

2.1.9 *Boxplot*

O *boxplot*, também denominado diagrama de caixa ou diagrama de caixa e bigodes, é um método gráfico simples utilizado para resumir visualmente e comparar conjuntos de dados numéricos. De acordo com Williamson, Parker e Kendrick (1989), o *boxplot* é uma técnica pertencente ao conjunto de métodos da análise exploratória de dados, cujo objetivo é identificar padrões que podem não ser facilmente observados em tabelas numéricas extensas.

Segundo os autores, o *boxplot* utiliza a mediana, os quartis aproximados e os valores mínimo e máximo para representar informações sobre o nível, a dispersão e a simetria da distribuição dos dados (Williamson; Parker; Kendrick, 1989). Uma das principais vantagens do *boxplot* é sua capacidade de resumir grandes volumes de dados de forma visual, facilitando a comparação entre diferentes grupos ou distribuições.

Na construção do *boxplot*, a caixa representa os 50% centrais da distribuição dos dados. A linha horizontal no interior da caixa corresponde à mediana, enquanto as extremidades inferior e superior da caixa representam, respectivamente, o primeiro e o terceiro quartis, denominados pelos autores como *hinges* (Williamson; Parker; Kendrick, 1989). Os bigodes conectam essas extremidades aos valores mais extremos da distribuição.

Os autores descrevem ainda um procedimento para a identificação de valores atípicos (*outliers*), baseado na distância entre os quartis, denominada *H-spread*. Valores localizados a uma distância superior a 1,5 vezes essa medida em relação aos quartis são considerados potenciais *outliers* e podem ser destacados separadamente no gráfico (Williamson; Parker; Kendrick, 1989). Caso não sejam identificados valores atípicos, o *boxplot* pode ser apresentado sem a indicação explícita desses limites.

A interpretação do *boxplot* permite avaliar a posição central dos dados, a variabilidade em torno da mediana e possíveis assimetrias da distribuição. Conforme destacado por Williamson, Parker e Kendrick (1989), o *boxplot* fornece informações quantitativas essenciais sobre a distribuição dos dados, mantendo clareza visual e sendo especialmente útil na comparação simultânea de múltiplos conjuntos de observações.

Embora o *boxplot* possa ser construído mesmo para conjuntos de dados com poucas observações, Krzywinski e Altman (2014) destacam que sua interpretação torna-se menos confiável quando o tamanho amostral é muito reduzido, especialmente para amostras com menos de cinco observações, uma vez que pequenas variações nos dados podem alterar substancialmente a posição dos quartis e da mediana.

2.1.10 Heatmap

O *heatmap* é uma representação gráfica bidimensional na qual os valores de uma variável são codificados por meio de cores, permitindo a visualização de padrões, concentrações e tendências nos dados. Esse tipo de visualização é particularmente útil para resumir grandes volumes de dados de forma sintética, facilitando a identificação de estruturas globais e relações entre variáveis (Bojko, 2009).

De acordo com Gu, Eils e Schlesner (2022), os *heatmap* são amplamente empregados em diferentes áreas científicas por sua capacidade de integrar informação numérica e visual em uma única representação. No entanto, os autores destacam que o *heatmap* é essencialmente uma ferramenta de visualização exploratória, não realizando inferência estatística por si só, devendo ser utilizado como complemento a métodos analíticos formais.

A interpretação de um *heatmap* depende diretamente das escolhas feitas durante sua construção, como a definição da escala de cores, o método de normalização dos dados e a forma de ordenação das linhas e colunas (Bojko, 2009). Alterações nesses parâmetros podem modificar substancialmente a aparência do gráfico, influenciando a percepção visual dos padrões presentes nos dados.

2.2 Etapa de campo

A etapa de campo teve como objetivo principal o reconhecimento geológico da área de estudo e a obtenção de amostras representativas para as análises laboratoriais subsequentes. Inicialmente, foram realizados trabalhos de prospecção e verificação dos afloramentos rochosos existentes, buscando identificar sua distribuição espacial, estado de conservação e grau de exposição. Esse reconhecimento permitiu avaliar as condições geológicas locais e selecionar os pontos mais adequados para a descrição detalhada e para a coleta de amostras.

Em cada afloramento visitado, procedeu-se à identificação do tipo litológico, considerando aspectos como textura, estrutura, cor, granulometria e relações de contato com unidades adjacentes. A caracterização das rochas foi complementada pela análise estrutural, com especial atenção à presença e orientação de foliações, fraturas e outras descontinuidades, as quais fornecem informações relevantes sobre os processos tectônicos atuantes na área. Essas observações foram registradas em caderno de campo, acompanhadas de registros fotográficos e anotações descritivas, garantindo a rastreabilidade das informações coletadas.

A mineralogia aparente das rochas também foi avaliada em campo, por meio da observação direta dos minerais constituintes, levando-se em conta características macroscópicas como brilho, hábito cristalino e grau de alteração. Sempre que possível, buscou-se identificar minerais indicadores associados a processos hidrotermais ou à presença de elementos de interesse, como os elementos terras raras. Essa avaliação preliminar auxiliou na definição dos locais mais promissores para a coleta de amostras.

A amostragem foi realizada de forma sistemática, contemplando rochas frescas, solos e rochas alteradas, quando presentes. A coleta de diferentes tipos de material teve como finalidade capturar a variabilidade geoquímica da área, considerando tanto os processos primários de formação das rochas quanto os processos secundários de intemperismo e alteração. As amostras foram coletadas com ferramentas adequadas, acondicionadas em recipientes apropriados e devidamente identificadas, garantindo a integridade do material até sua chegada ao laboratório.

Nos pontos amostrados, foi realizado o confronto entre as observações geológicas de campo e o posicionamento espacial em relação às anomalias geofísicas

previamente mapeadas. Essas anomalias incluíram dados radiométricos de urânio (U), tório (Th) e potássio (K), bem como informações do campo magnético. A correlação entre a geologia observada e as anomalias geofísicas permitiu avaliar possíveis associações entre determinados litotipos, estruturas geológicas ou zonas de alteração e respostas geofísicas anômalas, contribuindo para uma interpretação integrada da área de estudo.

Essa abordagem integrada, aliando dados de campo e informações geofísicas, mostrou-se essencial para a compreensão do contexto geológico local e para a definição de áreas com maior potencial mineral. O cruzamento dessas informações possibilitou refinar os critérios de seleção dos pontos amostrais e forneceu subsídios importantes para a interpretação dos resultados analíticos, reforçando a consistência e a confiabilidade das conclusões do estudo.

2.3 Etapa de Laboratório

2.3.1 Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV-EDS)

O Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV-EDS) constitui um instrumento altamente versátil e amplamente empregado na análise microestrutural de materiais sólidos. Embora os mecanismos físicos envolvidos na formação da imagem sejam complexos, os resultados obtidos apresentam elevada qualidade e interpretação relativamente simples. Em função dessas características, o MEV tornou-se uma ferramenta indispensável em diversas áreas do conhecimento, como eletrônica, geologia, ciência e engenharia dos materiais, bem como nas ciências da vida. De modo particular, o desenvolvimento de novos materiais exige um conjunto de informações detalhadas sobre a microestrutura, as quais só podem ser plenamente acessadas por meio dessa técnica, tornando o MEV um equipamento essencial em centros de pesquisa e desenvolvimento de materiais (Maliska, 2025).

O poder de aumento alcançado pelo MEV situa-se entre o microscópio óptico (MO) e o Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET). Em comparação ao microscópio óptico, sua principal vantagem reside na elevada resolução, que varia entre 2 e 5 nm (20 a 50 Å), podendo atingir atualmente valores próximos de 1 nm (10

Å), enquanto o MO apresenta resolução limitada a cerca de 0,5 µm. Em relação ao MET, embora este último possua maior capacidade de resolução, o MEV destaca-se pela maior facilidade e rapidez na preparação das amostras, o que contribui significativamente para sua ampla aplicação em estudos rotineiros (Maliska, 2005).

Além da resolução elevada, outros fatores reforçam a importância do MEV na caracterização de materiais. A grande profundidade de foco proporciona imagens com aparência tridimensional, permitindo melhor visualização das feições topográficas da superfície analisada. Ademais, o MEV possibilita a integração entre análise microestrutural e microanálise química, ampliando consideravelmente o potencial interpretativo da técnica. O estudo de superfícies de fratura, por exemplo, teve um avanço expressivo com o uso do microscópio eletrônico de varredura, permitindo a identificação detalhada dos mecanismos de ruptura e deformação dos materiais (Morales; Hinrichs; Fernandes, 2007).

O potencial analítico do MEV é ainda ampliado com a incorporação de detectores de raios X à câmara de amostras, possibilitando a realização de análises químicas pontuais ou distribuídas sobre a superfície observada. A partir da detecção e interpretação dos raios X característicos emitidos pela amostra, resultantes da interação do feixe de elétrons primários com a matéria, é possível obter informações qualitativas e quantitativas sobre a composição química em regiões submicrométricas (Maliska, 2005).

Essa capacidade favorece a identificação de fases, precipitados e variações composicionais dentro de um mesmo grão mineral ou material. Atualmente, a maioria dos microscópios eletrônicos de varredura encontra-se equipada com sistemas de análise por energia dispersiva de raios X, como é o caso do EDS, amplamente utilizados devido à sua confiabilidade, rapidez e facilidade de operação (Vieira *et al.*, 2021).

2.3.2 Processamento das amostras

Inicialmente, as amostras coletadas passaram por um processo de limpeza preliminar, cujo objetivo foi remover materiais indesejáveis que poderiam interferir nas análises posteriores. Essa etapa consistiu em um peneiramento grosseiro, realizado manualmente, para a eliminação de fragmentos maiores de rochas, bem como de matéria orgânica visível, como gravetos, restos de raízes e outros detritos superficiais.

Tal procedimento foi fundamental para garantir maior homogeneidade da amostra e minimizar a presença de contaminantes não representativos do material geológico de interesse.

Após essa etapa inicial de limpeza, as amostras foram submetidas ao processo de quarteamento, realizado três vezes consecutivas, conforme metodologia consagrada em trabalhos de preparação de amostras geológicas. O quarteamento teve como finalidade reduzir o volume do material, preservando sua representatividade estatística e mineralógica. Ao final desse procedimento, obteve-se a fração adequada para as análises laboratoriais, garantindo que a amostra analisada no Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV-EDS) refletisse, de forma fiel, a composição do conjunto original (Fotografia 1).

Fotografia 1 – Processo de quarteamento das amostras.



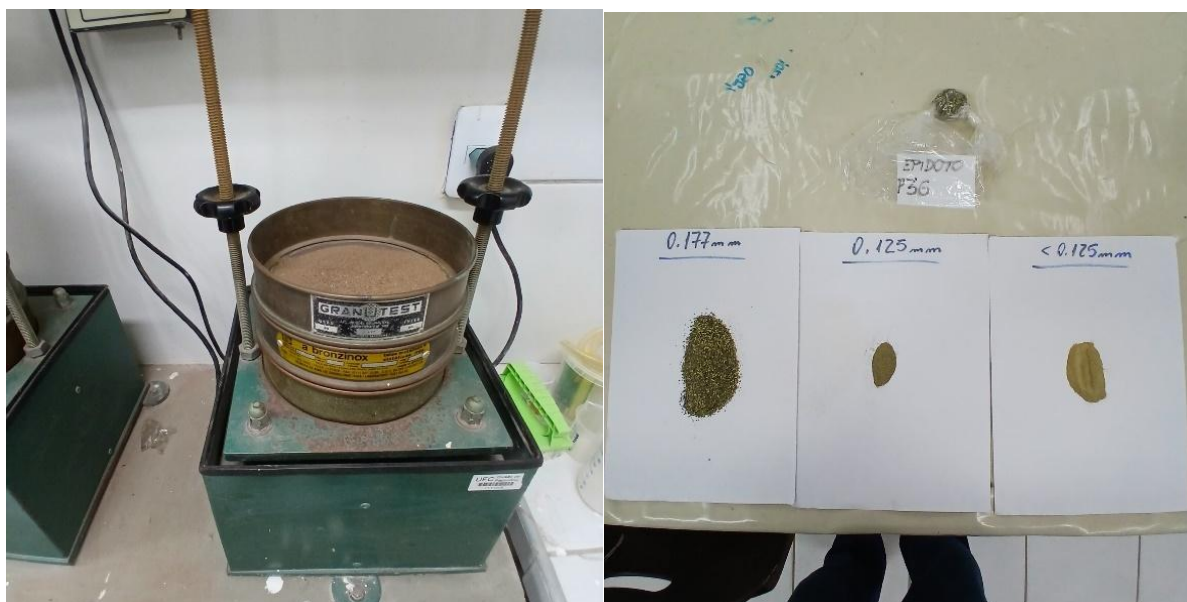
Fonte: Autor (2026).

A etapa seguinte compreendeu a preparação granulométrica das amostras, indispensável para a correta leitura e interpretação dos dados obtidos por meio do MEV-EDS. Para isso, foi realizado um peneiramento fino, utilizando um conjunto de peneiras padronizadas, submetidas a um sistema de trepidação mecânica durante um período de 10 minutos. Esse procedimento permitiu a separação das partículas de acordo com seu tamanho, favorecendo a análise comparativa entre diferentes frações

granulométricas e possibilitando a identificação mais precisa dos constituintes químicos e mineralógicos.

O conjunto de peneiras utilizado foi composto pelas malhas correspondentes às aberturas de 0,177 mm, 0,125 mm e o fundo coletor, que corresponde à fração com granulometria inferior a 0,125 mm (Fotografia 2). A partir desse processo, foram obtidas duas frações principais para análise: a fração retida acima de 0,125 mm e a fração passante, ou seja, aquela com granulometria inferior a 0,125 mm. A escolha dessas frações baseou-se na premissa de que diferentes tamanhos de partículas podem concentrar distintos minerais e, conseqüentemente, diferentes elementos químicos, incluindo os ETR.

Fotografia 2 – Laboratório de preparação de amostra



A

B

Fonte: Autor (2026).

Legenda: A) conjunto de peneiras utilizada e B) frações obtidas para análise (0,125mm e menor 0,125mm).

Após a obtenção das frações granulométricas selecionadas, ambas foram devidamente acondicionadas e preparadas para as análises em MEV-EDS. Essa etapa teve como principal objetivo a identificação qualitativa e semi-quantitativa dos óxidos e dos possíveis elementos terras raras presentes nas amostras de rocha e/ou solo. O uso do MEV-EDS permite não apenas a observação da morfologia das partículas, mas também a determinação da composição química pontual ou em áreas

específicas, constituindo uma ferramenta essencial em estudos mineralógicos e geoquímicos.

As análises foram realizadas no Microscópio Eletrônico de Varredura do Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia (DEGEO) da Universidade Federal do Ceará (UFC). O equipamento utilizado foi o microscópio Hitachi, série TM 3000 (Fotografia 3). Esse modelo de MEV destaca-se por sua capacidade de realizar análises rápidas e precisas, associando imagens de alta resolução à identificação dos elementos químicos por meio do sistema de espectroscopia de energia dispersiva, sem a necessidade de metalização prévia das amostras.

Fotografia 3 – MEV-EDS Laboratório de Microscopia Degeo-UFC.



Fonte: Autor (2026).

Durante as análises, a ênfase foi dada à identificação dos elementos químicos presentes nas diferentes frações granulométricas, com especial atenção à ocorrência de óxidos e de elementos associados ao grupo das terras raras. As leituras obtidas permitiram comparar a distribuição desses elementos entre as frações analisadas, contribuindo para uma melhor compreensão da concentração e do comportamento

geoquímico dos ETR nas amostras estudadas. Esses dados são fundamentais para interpretações sobre o potencial mineralógico do material analisado e para subsidiar estudos posteriores mais detalhados.

De modo geral, a metodologia adotada garantiu um controle rigoroso da preparação das amostras, reduzindo fontes de erro e assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos. A combinação entre procedimentos clássicos de preparação física, como peneiramento e quarteamento, e técnicas analíticas avançadas, como o MEV-EDS, possibilitou uma abordagem integrada e consistente para a caracterização química e mineralógica das amostras.

Como conclusão deste tópico metodológico, destaca-se que o conjunto de procedimentos empregados mostrou-se adequado e eficiente para a identificação dos elementos químicos e dos possíveis elementos terras raras presentes nas amostras de rocha e/ou solo. A preparação cuidadosa do material, aliada à análise por MEV-EDS, permitiu obter dados confiáveis e representativos, fornecendo uma base sólida para a interpretação dos resultados e para o desenvolvimento das discussões apresentadas ao longo do trabalho.

3 GEOLOGIA REGIONAL

3.1 Faixa Óros-Jaguaribe

A Faixa Orós-Jaguaribe representa um dos principais registros do Período Estateriano na região nordeste do Brasil, configurando-se como uma unidade geotectônica de grande relevância para a compreensão da evolução paleoproterozoica do Ceará. Essa faixa foi descrita em áreas adjacentes por diversos autores, com destaque para os trabalhos de Sá (1991) e Figueiredo Filho (1994), que a inserem no contexto das paleobacias de Orós e Jaguaribe. Tais estudos indicam que a faixa está associada a um período de intensa instabilidade tectônica, marcado por processos extensivos que afetaram a crosta paleoproterozoica, resultando em expressivo fraturamento crustal e no desenvolvimento de sistemas de rifteamento.

Durante o Estateriano, a região foi palco de significativa atividade vulcânica de caráter bimodal, associada à sedimentação predominantemente terrígena. Esse cenário geodinâmico reflete processos de tafrogênese, nos quais a crosta continental sofreu adelgaçamento progressivo, favorecendo a ascensão de magmas máficos e félsicos e a formação de bacias sedimentares alongadas (Parente; Arthaud, 1995).

Os depósitos sedimentares resultantes desse processo foram posteriormente submetidos a metamorfismo, originando uma sequência de metassedimentos que hoje compõem parte expressiva da Faixa Orós-Jaguaribe. Entre esses litotipos destacam-se metasiltitos e quartzitos atribuídos à Formação Santarém, que registram ambientes deposicionais continentais a transicionais, dominados por aporte clástico (Medeiros; Paula, 2019).

Figura 6 – Metasiltito da região Orós e quartzito da região Orós, respectivamente



A

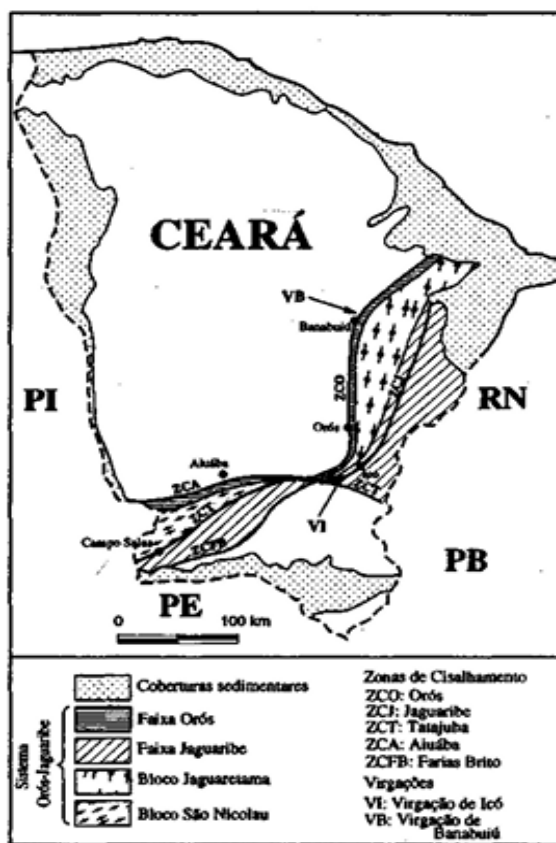
B

Fonte: Medeiros e Paula (2019).

Intercaladas a esses metassedimentos ocorrem unidades metavulcânicas de idade estateriana, em torno de 1,7 Ga, representadas principalmente por metabasaltos e metandesitos. Essas rochas refletem a natureza bimodal do magmatismo associado ao regime extensional, evidenciando pulsos vulcânicos contemporâneos à sedimentação. A presença dessas metavulcânicas fornece importantes indícios sobre a dinâmica tectônica do período, indicando que a evolução das paleobacias esteve intimamente ligada à atividade magmática e à reorganização da crosta continental (Lima, 2013).

A Faixa Orós-Jaguaribe apresenta uma geometria marcante, configurando um grande sigmóide com orientação geral norte-sul, característica típica de faixas móveis submetidas a eventos deformacionais subsequentes. Essa geometria resulta da superposição de fases tectônicas, que promoveram dobramentos, cisalhamentos e o reordenamento estrutural das unidades litológicas originais. Como consequência, as seqüências sedimentares e vulcânicas foram intensamente deformadas e metamorfizadas, preservando, contudo, registros importantes dos processos geológicos que atuaram durante o Paleoproterozoico (Parente; Arthaud, 1995).

Figura 7 – Faixa Orós-Jaguaribe.



Fonte: Parente e Arthaud (1995).

Associada a esse contexto evolutivo, destaca-se a Suíte Serra do Deserto, que ocorre intercalada às unidades metavulcano-sedimentares da faixa (Foto 4). Essa suíte é representada principalmente por augen gnaisses, cuja idade U–Pb é estimada em aproximadamente 1,77 Ga, conforme Pinéo (2017). Os augen gnaisses caracterizam-se pela presença de fenocristais de feldspato potássico, imersos em uma matriz máfica rica em anfibólios e biotita, conferindo às rochas uma textura porfiroclástica bem desenvolvida. Essas características indicam uma origem ígnea para o protólito, posteriormente submetido a deformação dúctil e metamorfismo regional.

Fotografia 4 – Ponto 1, augen gnaiss Suite Serra do Deserto, mostrando orientação de fenocristais de K-F.



Fonte: Autor (2025).

Do ponto de vista petrogenético, a Suíte Serra do Deserto representa um importante episódio magmático relacionado à evolução estateriana da região, possivelmente vinculado a estágios avançados do rifteamento ou a processos de acreção crustal. Sua associação espacial e temporal com as unidades metavulcânicas e metassedimentares reforça a interpretação de um ambiente tectônico dinâmico, no qual a interação entre sedimentação, vulcanismo e magmatismo intrusivo desempenhou papel central na construção da crosta paleoproterozoica local (De Paiva; De Medeiros, 2019).

Por fim, cabe destacar que a Faixa Orós-Jaguaribe constitui um registro expressivo dos processos de tafrogênese paleoproterozoica no Ceará, reunindo evidências de intensa deformação crustal, magmatismo bimodal e sedimentação terrígena. A associação entre metassedimentos, metavulcânicas estaterianas e corpos ígneos da Suíte Serra do Deserto reflete a complexidade dos eventos geodinâmicos que moldaram a região, ressaltando sua importância para a

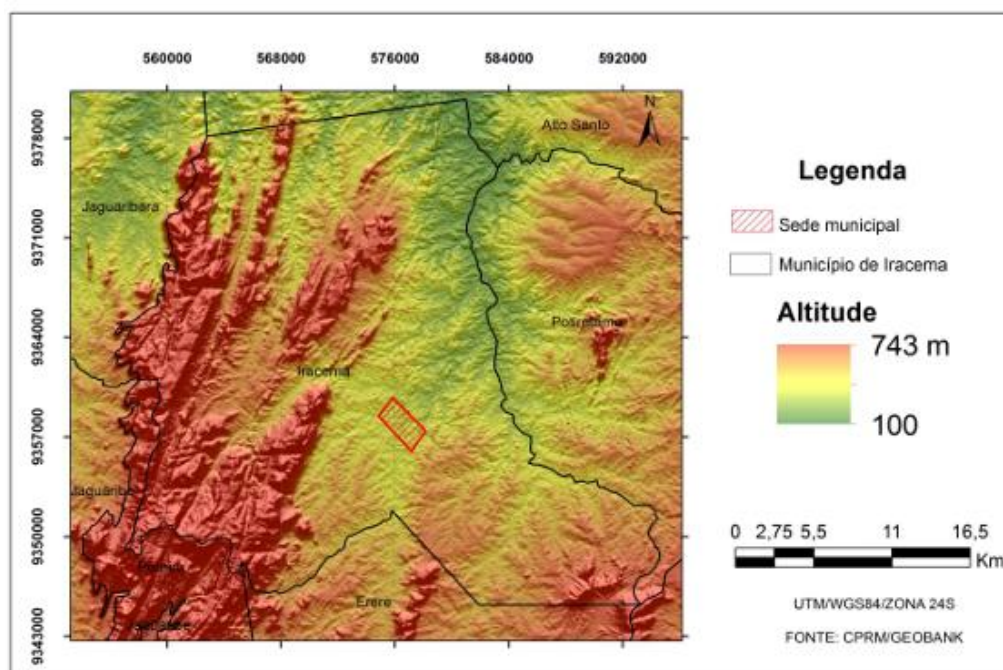
compreensão da evolução tectônica e geológica do nordeste brasileiro (Nogueira; Moreira, 2021).

3.2 Batólito Pereiro/São Miguel: Suíte São Miguel, Suíte Dr. Severiano

Geograficamente, esta unidade de mapeamento ocorre predominantemente na região das serras de São Miguel e Pereiro, configurando-se como um importante domínio geológico no contexto regional. Essa unidade é caracterizada pela presença de um expressivo corpo intrusivo, constituído por um grande plúton granitóide com área aproximada de 800 km², o que evidencia a magnitude do evento magmático responsável por sua formação. A expressiva extensão desse plúton indica um prolongado e intenso episódio de acreção magmática, com forte influência na arquitetura crustal da região (Magini; Hackspacher, 2008).

Do ponto de vista litológico, o plúton apresenta variações composicionais que vão de monzogranitos a quartzo-monzonitos, refletindo processos de diferenciação magmática e possíveis interações entre magmas de composições distintas. Essas rochas granitóides exibem, em geral, textura fanerítica, com granulação média a grossa, sendo compostas essencialmente por feldspato potássico, plagioclásio, quartzo e minerais máficos subordinados, como biotita e anfibólio. A diversidade composicional observada sugere um sistema magmático complexo, marcado por múltiplos pulsos intrusivos ao longo do tempo (Garces, 2019).

Figura 8 – Região do Plúton Pereiro.



Fonte: Garces (2019).

Além do corpo granitóide principal, a unidade é marcada pela ocorrência de numerosos enclaves máficos e de pequenos plútons básicos, que se encontram dispersos no interior do batólito. Esses enclaves representam fragmentos de magmas mais básicos que foram incorporados ao magma granítico durante sua ascensão ou cristalização, fornecendo importantes evidências de mistura magmática (*magma mixing*) e interação entre magmas de diferentes origens e temperaturas. A presença desses corpos básicos contribui para a heterogeneidade petrográfica da unidade e reforça a interpretação de um ambiente magmático dinâmico e multifásico (Nédélec; Bouchez, 2015).

Nesse contexto, destaca-se a individualização de duas suítes magmáticas distintas, associadas ao batólito. A Suíte São Miguel corresponde ao magmatismo ácido, sendo responsável pela geração dos granitóides que compõem a maior parte do corpo intrusivo. Essa suíte está relacionada a magmas ricos em sílica, possivelmente derivados da fusão parcial da crosta continental, e desempenha papel central na construção do batólito. Em contraste, a Suíte Dr. Severiano representa o magmatismo básico, associado à intrusão de magmas máficos, que se manifestam sob a forma de enclaves e plútons menores, indicando aporte mantélico e interação com os magmas crustais (Magini; Hackspacher, 2008).

A associação espacial e genética entre as suítes São Miguel e Dr. Severiano revela a coexistência e a interação entre magmatismos ácido e básico durante a evolução da unidade. Esse arranjo reforça a interpretação de um sistema magmático complexo, no qual processos como diferenciação, assimilação crustal e mistura de magmas contribuíram para a diversidade litológica observada. Dessa forma, a unidade de mapeamento das serras de São Miguel e Pereiro assume grande relevância para a compreensão da evolução magmática regional e dos processos geodinâmicos que atuaram na formação do batólito.

3.2.1 Suíte São Miguel

A Suíte São Miguel (Foto 6) não apresenta homogeneidade composicional, sendo marcada por significativa variação tanto textural quanto modal entre os principais minerais constituintes. Essa heterogeneidade reflete a complexidade do sistema magmático responsável por sua formação, indicando a atuação de múltiplos pulsos intrusivos e processos de diferenciação magmática. Apesar dessa variabilidade, observa-se o predomínio de rochas com textura porfiróide e composição quartzo-monzonítica, conforme a classificação de Streckeisen (1976), definição está sustentada por dados geoquímicos apresentados por Magini (2001). Essas rochas caracterizam-se pela presença de fenocristais, principalmente de feldspato potássico, imersos em uma matriz de granulação média a fina, conferindo aspecto típico aos litotipos da suíte.

Fotografia 5 – Suíte São Miguel

A

B



Fonte: Autor (2026).

Legenda: A) feições de afloraentos e B) textura do monzogranito de coloração creme claro, textura grossa com fenocristais de K-f e matriz com anfibólios.

Os contatos do Plúton São Miguel/Pereiro com as unidades do embasamento adjacente evidenciam relações estruturais bem definidas. A leste, o plúton encontra-se em contato com os ortognaisses do Complexo Pau dos Ferros, enquanto a oeste limita-se com os ortognaisses do Complexo Jaguaretama. Em ambos os casos, observa-se o truncamento das foliações entre o corpo intrusivo e as rochas encaixantes, indicando que a colocação do plúton ocorreu de forma discordante em relação às estruturas pré-existentes. Os contatos litológicos são, em sua maioria, bruscos, reforçando o caráter intrusivo do corpo granítico (Souza, 2017).

Na borda oeste do granito São Miguel/Pereiro destaca-se a presença da Zona de Cisalhamento de Pereiro, uma importante estrutura tectônica que controla as feições estruturais locais. Nesse setor, ocorre o desenvolvimento de foliação milonítica de planos verticais, que corta estruturas de redobramento coaxial previamente existentes nos ortognaisses encaixantes. A intensidade da deformação aumenta progressivamente em direção ao contato oeste do plúton, onde é registrada uma maior ocorrência de ultramilonitos, evidenciando um regime de strain tardio mais intenso nesse setor da intrusão (Maia; Bezerra, 2014).

Em contraste, a borda leste do Plúton São Miguel/Pereiro apresenta contatos litológicos mais complexos e heterogêneos. Nessa região, o monzogranito estabelece

relações de contato com diversas unidades geológicas, incluindo os ortognaisses do Complexo Pau dos Ferros, o Leucogranito Castelo, o Plúton Padre Cosme, o Plúton Poço Dantas e os muscovita-quartzitos do Grupo São José. Essa diversidade de contatos reflete a complexa história geológica da região, marcada pela superposição de eventos magmáticos e tectônicos ao longo do tempo (Garces, 2019).

Na porção central da borda leste, destacam-se a Bacia de Coronel João Pessoa, o Granito Padre Cosme, caracterizado pela presença de muscovita, e os metassedimentos do Grupo São José. Essas três unidades fazem limites diretos ou encontram-se em contato com o Plúton São Miguel/Pereiro, configurando um arranjo estratigráfico e estrutural bastante complexo. Os limites entre o plúton e a Bacia Sedimentar de Coronel João Pessoa são marcados por sistemas de fraturas verticais com direções predominantes ENE e SSE, ao longo das quais ocorrem cataclasitos e nódulos de quartzo, frequentemente na forma de calcedônia, indicando episódios de deformação frágil posteriores à intrusão (Magini; Hackspacher, 2008).

No extremo sudoeste da área de estudo, a Suíte São Miguel limita-se com o Plúton Poço Dantas e com os ortognaisses do embasamento cristalino. Nessa região, observa-se o truncamento das foliações tanto entre os dois plútons quanto entre estes e as rochas do embasamento, evidenciando uma complexa interação estrutural. As foliações do Plúton São Miguel/Pereiro são predominantemente miloníticas, verticais e com direção NE, enquanto as foliações do Plúton Poço Dantas acompanham a geometria circular do corpo intrusivo, formando feições estruturais do tipo ponto tríplice. Nos ortognaisses encaixantes, a foliação predominante apresenta direção NW, sendo fortemente truncada pela Zona de Cisalhamento São José, que possui direção NE (Faria; Meira; Schiavetti, 2018).

A Suíte São Miguel apresenta elevada complexidade composicional e estrutural, refletindo a interação entre processos magmáticos e tectônicos ao longo de sua evolução. A variabilidade textural, os contatos intrusivos bruscos e a intensa deformação registrada em zonas de cisalhamento evidenciam um histórico geodinâmico marcado por múltiplos eventos de intrusão, deformação dúctil e frágil. Essas características conferem à Suíte São Miguel um papel fundamental na compreensão da evolução tectono-magmática regional e das relações entre os corpos graníticos e o embasamento cristalino adjacente.

3.2.2 Suíte Dr. Severiano

A Suíte Dr. Severiano representa a expressão do magmatismo brasileiro de caráter básico na área de estudo, constituindo um importante componente da evolução magmática regional. Esse magmatismo manifesta-se em campo principalmente por meio de rochas denominadas Dioritos Dr. Severiano, que ocorrem tanto como corpos individualizados quanto associados a outros litotipos intrusivos. Os dioritos apresentam composição intermediária a básica, com predominância de plagioclásio e minerais máficos, como anfibólio e biotita, refletindo a contribuição de magmas de origem mantélica e sua interação com a crosta continental durante os eventos tectono-magmáticos do Ciclo Brasileiro (Souza *et al.*, 2017).

Além dos dioritos, a Suíte Dr. Severiano engloba o Plúton Poço Dantas, que constitui um dos principais representantes desse magmatismo básico na região. Esse plúton evidencia a atuação de pulsos intrusivos associados a um contexto geodinâmico marcado por intensa atividade tectônica, favorecendo a colocação de magmas básicos em níveis crustais superiores. A associação espacial e genética entre os Dioritos Dr. Severiano e o Plúton Poço Dantas reforça a interpretação de um sistema magmático integrado, no qual o magmatismo básico desempenhou papel fundamental na evolução estrutural e composicional da região, contribuindo para a diversidade litológica observada e para a compreensão dos processos associados ao magmatismo brasileiro (Magini; Hackspacher, 2008).

3.2.2.1 Dioritos Dr. Severiano

Os corpos intrusivos associados à Suíte Dr. Severiano são litologicamente caracterizados por dioritos finos equigranulares e dioritos grosseiros equigranulares, sendo esta última fácies particularmente bem representada nos arredores da cidade de Dr. Severiano (Foto 7). Esses corpos ocorrem predominantemente na porção oeste da área de estudo, inseridos tanto no Plúton São Miguel/Pereiro quanto no Plúton Padre Cosme. Associados aos dioritos, observam-se localmente granitos finos equigranulares, que se apresentam sob a forma de diques sin-plutônicos e lentes centimétricas, indicando interação direta entre magmas básicos e ácidos durante a evolução do sistema magmático (Beltrão *et al.*, 2005).

Fotografia 6 – Suite Dr Severiano, dioritos e gabros.



Fonte: Autor (2026).

Os dioritos hospedados no Plúton São Miguel/Pereiro exibem, em geral, formas arredondadas a subcirculares, assemelhando-se a “bolhas” ou corpos circulares de dimensões métricas, distribuídos de maneira aparentemente aleatória. Entretanto, nos arredores da cidade de Dr. Severiano, esses corpos atingem dimensões quilométricas e apresentam alongamento preferencial na direção NE–SW. Nesses casos, os grandes corpos dioríticos refratam a foliação do Plúton São Miguel/Pereiro, evidenciando sua colocação em um contexto tectônico ativo. Na porção sul da área, os dioritos mostram-se mais intensamente deformados, formando corpos alongados e, em muitos casos, anfibolitizados, o que indica maior grau de metamorfismo e *strain* tectônico nessa região (Lages *et al.*, 2016).

Os corpos dioríticos próximos à cidade de Dr. Severiano apresentam foliação incipiente e preservam abundantes estruturas magmáticas primárias. São frequentes feições associadas a processos de magma *mixing* e magma *mingling*, tais como contatos irregulares entre litotipos, diques compostos e enclaves com bordas lobadas (Morgavi *et al.*, 2022). Além disso, são observadas numerosas evidências de assimilação e contaminação entre os magmas dioríticos e seus encaixantes,

expressas por processos como biotitização, anfibolitização e albitização. Esses mecanismos promovem a concentração seletiva de determinados minerais, resultando localmente em composições de caráter cumulático (Fontana *et al.*, 2012).

Outro aspecto relevante da Suíte Dr. Severiano é a ocorrência de litotipos formados por minerais de granulação grosseira, com cristais centimétricos. Essa litologia é encontrada principalmente entre as cidades de São Miguel e Pereiro, na porção noroeste do Plúton São Miguel/Pereiro, onde se observam fragmentos métricos agrupados e levemente orientados segundo a direção NE. Essas rochas são ricas em biotita e hornblenda, apresentam estrutura predominantemente maciça e foliação incipiente a ausente, e exibem minerais com zoneamento intracristalino do tipo coronítico, indicando condições específicas de cristalização e reequilíbrio mineral (Magini; Hackspacher, 2008).

Do ponto de vista geoquímico, análises realizadas por Magini (2001) revelam pequenas variações composicionais entre os diferentes tipos de dioritos, independentemente da granulometria. Essa homogeneidade geoquímica é corroborada pelos estudos petrográficos, que indicam a ocorrência recorrente dos principais minerais constituintes, como hornblenda, plagioclásio, biotita e feldspato potássico, em todas as fácies dioríticas. As diferenças observadas concentram-se principalmente nas proporções relativas e nas dimensões dos minerais, fatores que controlam a variação dos teores dos elementos químicos presentes nas rochas.

O corpo diorítico mais meridional, localizado nas proximidades do açude de Bonito, exhibe estruturas de dobramento bem desenvolvidas. Nesse setor, os diques encontram-se paralelizados e posicionados preferencialmente nas regiões marginais da rocha encaixante, representada pelo Plúton São Miguel/Pereiro. Os corpos de formas arredondadas são mais abundantes e truncam de maneira suave a foliação do plúton, indicando, localmente, caráter tardio em relação à intrusão granítica. Na depressão topográfica existente entre as cidades de São Miguel e Pereiro, ocorrem corpos cumuláticos que estabelecem contatos de truncamento com o monzogranito, sendo que os corpos básicos apresentam foliação com mergulho sub-horizontal para o sul (Heinrichs *et al.*, 2014).

A ocorrência de enclaves dioríticos com variadas formas geométricas e diferentes relações temporais é uma característica comum em batólitos graníticos cálcio-alcálicos, conforme destacado por Pitcher (1983). A proximidade desses corpos básicos com zonas de cisalhamento pode resultar na reorientação de enclaves

originalmente discordantes, enquanto porções internas do batólito podem preservar relações estruturais tardias, interpretadas como xenólitos ou injeções magmáticas.

O estudo de Pitcher (1983) demonstra que rochas básicas em batólitos tendem a formar associações plurilitológicas residuais, frequentemente acompanhadas por pequenas frações cumuláticas. Essas relações são claramente observadas nas diferentes variações de dioritos identificadas na Suíte Dr. Severiano, incluindo dioritos com plagioclásio dominante, dioritos ricos em hornblenda, dioritos com hornblenda e biotita, além dos dioritos de granulação grosseira.

Associados aos plútons da Suíte Dr. Severiano ocorrem pegmatitos métricos com direção aproximada de 50° de azimute. Esses pegmatitos cortam tanto a foliação magmática quanto a metamórfica das rochas encaixantes, sendo interpretados como o último evento magmático registrado na área. Sua ocorrência marca a fase final de cristalização e diferenciação do sistema magmático, encerrando a história evolutiva associada à Suíte Dr. Severiano (Araújo; Da Silva; De Sá, 2001).

3.2.2.2 Plúton Poço Dantas

O Plúton Poço Dantas, localizado na porção sudoeste da área de estudo, apresenta morfologia elíptica a ovalada, abrangendo aproximadamente 25 km². Litologicamente, é composto por um granitóide de composição quartzo-monzodiorítica, com textura porfiróide característica. O plutão está limitado na borda oeste pela Suíte São Miguel, a sul pelos ortognaisses do Complexo Pau dos Ferros e a norte pela sequência metavulcano-sedimentar do Grupo São José. Essa disposição evidencia o caráter intrusivo do corpo, inserido em um contexto geológico complexo, marcado pela interação entre diferentes litotipos e pela superposição de eventos tectono-magmáticos (Garces, 2019).

Os contatos litológicos do Plúton Poço Dantas são predominantemente bruscos, sendo frequente a ocorrência de zonas de cisalhamento dextrais ao longo das bordas. Na porção sul, onde o plutão limita-se com os ortognaisses do embasamento e com as rochas da Suíte São Miguel, observa-se truncamento das foliações, que se tornam paralelas à Zona de Cisalhamento São José. O formato ovalado do plutão provoca refração das foliações das rochas encaixantes, gerando localmente feições estruturais de ponto tríplice. Estruturalmente, as bordas do plutão exibem foliação paralela às zonas de cisalhamento, enquanto na parte interna as

foliações apresentam mergulho entre 55° e 70° para S–SW, indicando que a deformação por cisalhamento afetou de forma mais intensa os limites litológicos, promovendo, em alguns trechos, a formação de milonitos ricos em biotita (Souza *et al.*, 2017).

Petrograficamente, o Plutão Poço Dantas é constituído por um Qz-diorito porfiróide de textura relativamente homogênea (Foto 8), composto por fenocristais de plagioclásio imersos em uma matriz grosseira formada por hornblenda, biotita, flogopita, titanita, minerais opacos e apatita. Os minerais apresentam zoneamento intracristalino e bordas de reação, bem como contatos intercrescidos, evidenciando a preservação de feições primárias e o controle da cristalização magmática sobre a textura final da rocha. Nas bordas do plutão, veios centimétricos de calcita são comuns, interpretados como resultado de processos metamórficos subsequentes, nos quais o cálcio dos plagioclásios foi mobilizado para formar os veios, reforçando a interação entre magmatismo e metamorfismo regional (Magini; Hackspacher, 2008).

Fotografia 7 – Plúton diorítico de Poço Dantas.



Fonte: Autor (2026).

O Plúton Poço Dantas representa uma expressão significativa do magmatismo básico associado à Suíte Dr. Severiano, com feições composicionais e estruturais que

refletem a complexa história de intrusão, deformação e metamorfismo da região. A combinação de contatos bruscos, foliação interna inclinada, zonas de cisalhamento marginais e preservação de feições magmáticas primárias evidencia a importância desse plutão para compreender a dinâmica tectono-magmática regional, bem como os processos de interação entre corpos básicos e o embasamento cristalino circundante.

3.3 Bacia de Coronel João Pessoa

As bacias sedimentares de Coronel João Pessoa e Icozinho são marcadas pela predominância de sedimentos arenosos de idade mesozóica, refletindo processos deposicionais que se desenvolveram sobre o embasamento cristalino da região. Estas bacias encontram-se encaixadas no Granito São Miguel/Pereiro, sendo suas bordas controladas por uma rede de falhas e fraturas que determinam a geometria e a dinâmica sedimentar (Albuquerque; Xavier; Suertegaray, 2024).

Na bacia de Coronel João Pessoa, as falhas e fraturas possuem orientação NE–SW, com azimute aproximado de 50° , conferindo à bacia uma configuração geométrica romboédrica, enquanto na bacia de Icozinho, a orientação predominante das fraturas também é NE–SW, mas com azimute em torno de 30° , resultando em uma geometria em forma de cunha, aberta para a porção sudoeste da área. Essas feições estruturais indicam que o controle tectônico foi determinante para a definição do encaixamento das bacias e para a deposição dos sedimentos, evidenciando um regime extensional ou transtensional durante a mesozóica (Souza, 2014).

A observação macroscópica e petrográfica dos arenitos permite identificar claramente a derivação mineralógica a partir de fontes graníticas, com fragmentos e grãos de granitóides contendo feldspatos e micas dominantes, evidenciando o retrabalho de materiais provenientes da erosão de corpos graníticos pré-existentes, como o Granito São Miguel/Pereiro, e de forma subordinada, de ortognaisses do embasamento (Lima; De Souza, 2022).

Fotografia 8 – Arenito com clastos de quartzo e feldspato de tamanhos centimétricos.



Fonte: Uvula (2023).

O estudo petrográfico desses arenitos reforça a interpretação de uma proveniência local, onde os feldspatos apresentam variados graus de intemperismo químico e físico, refletindo processos de transporte relativamente curto, enquanto as micas, especialmente biotita e muscovita, permanecem parcialmente preservadas, fornecendo indicadores adicionais da fonte granítica. Além disso, a presença de fragmentos angulosos de rochas encaixantes e a variação granulométrica dentro das camadas reforçam a heterogeneidade deposicional típica de sistemas fluviais proximais, nos quais canais migratórios e eventos de inundação promovem deposição irregular e localmente concentrada de sedimentos (Souza, 2014).

A geometria das bacias também influencia diretamente a distribuição e preservação dos sedimentos. Na bacia de Coronel João Pessoa, a configuração romboédrica, controlada pelas fraturas de NE–SW, favoreceu a acumulação mais uniforme dos arenitos, enquanto na bacia de Icozinho, a geometria em cunha aberta para o sudoeste resultou em espessamentos sedimentares progressivos em direção à extremidade aberta da bacia. Essa variação de espessura está intimamente relacionada à dinâmica de acomodação do espaço tectônico e à direção do transporte sedimentar, sugerindo que o controle estrutural desempenhou papel fundamental na evolução sedimentológica de ambas as unidades (Rêgo *et al.*, 2020).

Do ponto de vista sedimentológico, os arenitos refletem uma história de deposição influenciada por fatores tectônicos, climáticos e hidrodinâmicos. O alto teor de grãos grosseiros, a baixa seleção e a presença de estratificações cruzadas indicam energia deposicional elevada e transporte relativamente rápido, enquanto a

mineralogia derivada de granito e a presença de fragmentos de rochas encaixantes evidenciam um fornecimento contínuo de material proveniente do embasamento cristalino circundante (Lima; De Souza, 2022).

Assim, a análise integrada da geometria das bacias, da estrutura das fraturas e das características litológicas dos arenitos permite reconstruir cenários deposicionais mesozóicos consistentes com ambientes fluviais proximais encaixados em contextos tectonicamente ativos. O mapa geológico encontra-se no anexo 1.

4 GEOLOGIA LOCAL

Neste capítulo são apresentadas as descrições petrográficas das unidades geológicas Suíte Serra do Deserto e Batólito Pereiro–São Miguel, bem como a caracterização dos locais nos quais foi aplicada a metodologia de estudo voltada à investigação de elementos terras raras (ETRs). Para esse fim, foram amostradas as seguintes unidades geológicas: Suíte Serra do Deserto, representada por augen gnaisses; e Batólito Pereiro–São Miguel, compreendendo as unidades Suíte São Miguel e Suíte Dr. Severiano. A distribuição espacial dos pontos de amostragem encontra-se apresentada no Mapa Geológico (Anexo 1).

4.1 Formação Suíte Serra do Deserto, Faixa Jaguaribe (Pontos 1, 5, 37,38,39)

4.1.1 Petrografia

Em seção delgada, os augen gnaisses apresentam textura variável de granoblástica a milonítica bandada, com granulação fina a média. Observam-se bandas finas e porções alongadas constituídas predominantemente por feldspato potássico e plagioclásio, os quais se encontram recristalizados em subgrãos ou organizados em agregados de neoblastos poligonizados, evidenciando intensa deformação dúctil.

A mineralogia essencial é composta por feldspato potássico (38%), quartzo (25%), plagioclásio (12%), biotita (15%) e anfibólio (8%). Os minerais acessórios incluem titanita, epidoto, monazita, zircão, allanita, apatita e minerais opacos.

Os cristais de feldspato potássico são predominantemente xenoblásticos, com recristalização em subgrãos e textura poligonizada, exibindo maclas Albita–Periclina em padrão xadrez, típicas do microclínio. São comumente pertíticos, ocorrendo em barras deformadas e apresentando alteração para argilominerais. Os cristais de plagioclásio (albita) também são xenoblásticos, raramente geminados segundo a lei da Albita, e mostram alterações incipientes para argilominerais. Em alguns casos, observa-se intercrescimento com quartzo, formando mirmequita na borda de cristais de feldspato potássico.

O quartzo ocorre sob a forma de cristais anédricos, por vezes alongados, exibindo extinção ondulante e frequente recristalização em subgrãos, compatível com

deformação em regime dúctil. A biotita apresenta-se em cristais lamelares a tabulares, agregados e orientados segundo a foliação, com pleocroísmo castanho-escuro a pardo-acastanhado, frequentemente oxidada e, por vezes, contendo inclusões de monazita e zircão. O anfibólio, identificado como hornblenda, ocorre em cristais prismáticos a colunares, alongados e orientados, com pleocroísmo verde a verde-escuro, geralmente associado à biotita e a grânulos de titanita.

As paragêneses minerais observadas são indicativas de metamorfismo em fácies anfibolito a anfibolito alto, coerente com a deformação e recristalização registradas nas amostras (Fotografia 9).

Fotografia 9 – Textura de augen gnaiss (Suite Serra do Deserto, ponto 37)



Fonte: Autor (2026).

Legenda: É mostrado a foliação anastomosada, e fenocristais sigmoidais de k-f. Matriz máfica com anfibólios, biotita.

4.1.2 Descrição de campo e amostragem

4.1.2.1 Ponto 1, 5, 37, 38, 39: Unidade Geológica - Suíte Serra do Deserto

Nos pontos amostrados, os augen gnaises afloram sob a forma de rochas fortemente foliadas, com planos penetrativos bem desenvolvidos, definindo uma foliação tectônica marcada pela orientação dos minerais máficos e pela deformação dos fenocristais de feldspato potássico. Observa-se intensa recristalização tanto dos fenocristais quanto da matriz, além da presença de veios de quartzo injetados, associados a zonas de maior deformação (Fotografia 10).

No Ponto 1, foram coletadas amostras da rocha fresca a alterada, bem como do solo derivado diretamente da alteração da rocha-mãe, caracterizando solos autóctones. A amostragem do solo concentrou-se na camada superficial de aproximadamente 30 cm, representativa dos estágios iniciais do perfil de intemperismo desenvolvido sobre o augen gnaisse.

Fotografia 10 - A) Ponto 1: Augen gnaisse (Suíte Serra do Deserto) e B) Ponto 38 Augen gnaisse alterado amostrado para solo.

A



B



Fonte: Autor (2026)

Legenda: A) Ponto 1: Augen gnaisse (Suíte Serra do Deserto) de coloração avermelhado a creme, intemperizado com injeções de quartzo. B) Ponto 38 Augen gnaisse alterado amostrado para solo.

Augen gnaiss ocorre intercalado com metassedimentos da Formação Santarém, foliação sub vertical N-S (*trend*). Texturalmente destaca-se pórfiros de K-F estirados com matriz biotítica e por vezes cloritas secundárias. Como observado no Ponto 02.

O augen gnaiss ocorre na forma cristas topográficas com desnível marcante e íngreme, pois são mais resistentes a erosão em relação aos metassedimentos que as bordeja, os Pontos 37, 38 e 39 apresentam esta feição geomorfológica. No ponto 38 o solo amostrado está em contato com a rocha ainda presente, formando um regolito de 2m de espessura, nesta parte a rocha alterada também foi amostrada (Fotografia 10B).

O Ponto 37 foi amostrado o solo do Augen Gnaiss (Fotografia 11).

Fotografia 11 – Amostragem de solo raso no ponto 37



Fonte: Autor (2026)

Legenda: Solo autóctone do Augen Gnaiss Suite Serra do Deserto

4.1.2.2 *Batólito Pereiro/São Miguel (Pontos 10, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 36, 35)*

Observa-se uma maior concentração de estruturas magmáticas na porção interna do plúton, localizada a sudoeste da cidade de São Miguel. Nessa área, as

foliações apresentam caráter heterogêneo, com múltiplas orientações, o que, em diversos pontos, dificulta a distinção entre planos estruturais e planos magmáticos primários. A textura predominante é porfiróide, marcada pela presença de fenocristais de feldspato potássico de coloração rósea e morfologia subangular, imersos em matriz de granulação mais fina.

Os fenocristais de feldspato potássico representam aproximadamente 30% a 50% do volume da rocha, sendo o restante constituído pela matriz. A composição mineralógica primária, obtida por análise modal, varia entre feldspato potássico (30–50%), plagioclásio (20–32%), quartzo (15–20%), minerais opacos (7–10%), hornblenda ($\approx 5\%$), biotita ($\approx 3\%$) e minerais acessórios ($\approx 8\%$), incluindo apatita, titanita, epidoto, allanita e granada.

As microtexturas observadas no plúton incluem intercrescimentos entre as fases feldspáticas, além de fenocristais localmente rotacionados e imbricados, sugerindo dinâmica magmática ativa durante a cristalização. São comuns cristais de plagioclásio euédricos ocorrendo como inclusões em fenocristais subeuédricos de feldspato potássico, evidenciando relações de crescimento e cristalização sucessiva. Os anfibólios ocorrem sob duas gerações distintas, representadas por hornblendas ígneas e metamórficas. As hornblendas ígneas apresentam inclusões de titanita euédrica de hábito losangular, interpretadas como produtos da fase magmática de cristalização. Essas hornblendas exibem coloração verde muito escura, indicando elevados teores de ferro, compatíveis com a classificação como hornblenda do tipo ferro-astingtonita, conforme descrito por Magini (2001).

O Batólito Pereiro–São Miguel apresenta afloramentos representativos, como no Ponto 34, onde se observa a coexistência de uma fácies grosseira, caracterizada por fenocristais de feldspato potássico, inter cruzada por uma fácies fina, constituída por granitos de injeção associados ao preenchimento de fraturas tardias, evidenciando múltiplos pulsos magmáticos durante a evolução do corpo intrusivo (Fotografia 12).

Fotografia 12 – A) Solo proveniente da alteração do Granito porfirítico, Suite São Miguel (Ponto 34) e B) rocha exibindo fáceis grosseira com fenocristais de k-f e veios tardios de granito equigranular fino.

A



B



Fonte: Autor (2026)

4.1.2.3 *Suíte Dr. Severiano (Pontos 29, 30, 31, 32, 33, 40, 11)*

Os dioritos da Suíte Dr. Severiano apresentam três fácies petrográficas principais, associadas a variações texturais e modais: (i) dioritos de textura fina, (ii) dioritos de textura grosseira e (iii) dioritos de textura cumulática, estes últimos caracterizados pela presença de fenocristais centimétricos de plagioclásio bordejados por agregados de biotita. As proporções minerais descritas a seguir baseiam-se em análises modais representativas de cada fácies.

Os dioritos de textura fina são predominantemente equigranulares, apresentando composição média constituída por plagioclásio ($\approx 40\%$), feldspato potássico ($\approx 5\%$), hornblenda ($\approx 20\%$), biotita ($\approx 18\%$), titanita + ilmenita ($\approx 5\%$), além de clorita e muscovita ($\approx 2\%$) e apatita ($\approx 1\%$). Nos contatos com os dioritos de textura grosseira, observa-se corrosão mineral, bem como neocristalização de micas e feldspatos, indicando a ocorrência de processos de assimilação e contaminação magmática. Esses processos resultaram na formação de filmes descontínuos de granitos cinza, interpretados como produtos de interação entre magmas de composições distintas.

Os dioritos de textura grosseira são compostos essencialmente por plagioclásio, biotita e hornblenda. Minerais com afinidade geoquímica semelhante, especialmente ricos em FeO e MgO, exibem intercrescimentos frequentes, como associações biotita–hornblenda, além de inclusões de biotita em hornblendas zonadas. Nos espaços intergranulares são comuns titanitas, associadas a uma fase de oxidação envolvendo ilmenita e titanita, relacionada à ativação de planos cristalográficos nas hornblendas. Pequenos volumes intergranulares são localmente preenchidos por quartzo intersticial, por vezes associado à muscovita como mineral acessório.

Os dioritos de textura grosseira cumulática são formados predominantemente por plagioclásio, biotita e hornblenda, com cristais de dimensões centimétricas apresentando contatos retos a corróidos, além de texturas interdigitadas, intercrescidas e sobrecrescidas, típicas de processos cumuláticos. Essas rochas registram intensa deformação frágil, caracterizada por fraturamento penetrativo, cujos planos são frequentemente preenchidos por apatita euédrica tardia. Esse fraturamento é interpretado como relacionado a movimentos tectônicos extensivos, possivelmente associados à formação da Bacia de Coronel João Pessoa. Os corpos dioríticos cumuláticos situados na depressão entre os municípios de São Miguel e Pereiro são os mais intensamente afetados por esse processo, apresentando maior concentração de apatita em comparação às demais fácies dioríticas (Magini, 2001).

Em campo, os dioritos da Suíte Dr. Severiano variam de granulação fina a média, ocorrendo frequentemente em contatos bruscos com gabros. São comuns veios tardios de granito fino e pequenos corpos aplíticos, que cortam as rochas em múltiplas direções, evidenciando eventos magmáticos posteriores (Fotografia 13).

Fotografia 13 - Dioritos Dr Severiano na cidade de Dr. Severiano



Fonte: Autor (2026).

Legenda: Na fotografia é demonstrado a textura homogênea fina e entrecortado por pegmatitos.

Observam-se, na fotografia 14, duas fácies principais: dioritos finos e gabros mais grosseiros, estes últimos contendo flogopita. As rochas, de modo geral, apresentam-se pouco deformadas, com ocorrência frequente de autólitos máficos em ambas as fácies, sugerindo processos de mistura e diferenciação magmática.

No Ponto 34, foram coletadas amostras da rocha e do solo autóctone imediatamente sobrejacente ao embasamento rochoso (Fotografia 14). O solo apresenta coloração esverdeada, textura fina e aspecto homogêneo, tendo sido amostrada a camada superficial correspondente aos primeiros 10 cm, representativa dos estágios iniciais de intemperismo dos dioritos da Suíte Dr. Severiano.

Fotografia 14 – Amostragem de solo Suite Dr. Severiano (dioritos), solo raso de coloração esverdeado e fino (ponto 34)



Fonte: Autor (2026).

4.1.2.4 *Dioritos Pluton Poço Danta (Pontos 41, 42, 43, 44)*

A rocha apresenta textura augen, resultante do estiramento e deformação dos fenocristais de plagioclásio, os quais correspondem a aproximadamente 50% a 55% do volume da rocha. Esses fenocristais encontram-se envolvidos por uma matriz foliada composta por biotita ($\approx 20\%$), hornblenda ($\approx 18\%$), minerais opacos ($\approx 6\%$), quartzo ($\approx 2\%$), clorita ($\approx 1\%$) e feldspato potássico em teores traço, ocupando principalmente os espaços intergranulares.

Os fenocristais de plagioclásio exibem intercrescimento com biotita, configurando uma textura ofítica (Fontoura, 2024), caracterizada, neste caso, pela presença de abundantes inclusões de biotita no interior dos cristais de plagioclásio. As hornblendas apresentam-se frequentemente zonadas, do tipo coronada, sugerindo reequilíbrio mineral associado a eventos metamórficos ou hidrotermais subsequentes.

Os cristais de titanita ocorrem predominantemente sob a forma euédrica, com hábito losangular. Em alguns casos, observa-se recristalização parcial ou total, resultando na transformação da textura primária euédrica em estruturas mais difusas ou amorfas, interpretadas como titanitas metamórficas. Os fenocristais de plagioclásio

exibem ainda evidências claras de deformação, como planos de rotação, envergamento das maclas de geminação e fraturamento intragranular.

Os minerais prismáticos, especialmente os anfibólios, assim como as biotitas, encontram-se orientados segundo a foliação metamórfica, bordejando os cristais de plagioclásio e reforçando a textura augen. A foliação milonítica acompanha, de modo geral, a forma ovalada do corpo plutônico, enquanto porções internas exibem mergulho preferencial para sul. Estruturas planares discordantes dessa foliação principal podem estar associadas a movimentos magmáticos primários, preservados localmente apesar da deformação posterior.

Associados à borda noroeste do plúton, ocorrem corpos métricos de mármore, dispostos sob a forma de lentes encaixadas em zonas de cisalhamento. Esses mármore manifestam-se como exsudações, na forma de veios e lentes orientadas paralelamente à foliação milonítica. Tais corpos são interpretados como produtos de processos metassomáticos, relacionados à mobilização e perda de cálcio da rocha encaixante durante o metamorfismo (Magini, 2001).

Fotografia 15 – A) Diorito Poço Dantas (Ponto 41) com forte epidotização, B) Perfil do solo do Ponto 42, camada superficial vermelho latossolo e camada verde abaixo litossolo dos dioritos Pluton Poço Dantas, local com forte epidotização.

A



B



Fonte: Autor (2026).

O Plúton Poço Dantas foi investigado nos afloramentos correspondentes aos pontos 41, 42, 43 e 44. Na borda do corpo, observa-se intenso hidrotermalismo, caracterizado por forte epidotização, associado a zonas de cisalhamento que margeiam o plúton (Fotografia 15A). Nessas áreas, foram coletadas amostras da rocha epidotizada e do solo derivado, ressaltando-se que o epidoto é um mineral potencialmente concentrador de ETRs, aspecto relevante para os objetivos do estudo.

Na porção interna do plúton, predominam rochas com baixo grau de deformação, representadas por gabros de granulação fina a grosseira, ocorrendo localmente níveis de mármore intercalados. No Ponto 42, foi amostrado o perfil de solo autóctone, composto por uma camada superficial avermelhada, de caráter latossólico, sobreposta a uma camada esverdeada, litossólica, diretamente relacionada à alteração dos dioritos do Plúton Poço Dantas (Fotografia 15B).

5 RESULTADOS (MEV-EDS)

A interpretação dos resultados químicos obtidos por meio das análises em Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectrometria de Energia Dispersiva (MEV-EDS) baseia-se nos teores expressos em percentual de óxidos (%) dos elementos químicos detectáveis pelo método. Ressalta-se que os resultados refletem a composição pontual das fases analisadas, sendo representativos dos minerais presentes nas amostras selecionadas.

Para as análises em EDS, foram escolhidas amostras consideradas potencialmente favoráveis à concentração de elementos terras raras (ETRs), com base em critérios petrográficos, mineralógicos e em dados previamente reportados na literatura técnica e em relatórios institucionais. As amostras analisadas correspondem às seguintes unidades geológicas:

- Augen gnaisse da Suíte Serra do Deserto, selecionado por apresentar ocorrências de fluorita em áreas correlatas e anomalias de ETRs reportadas em relatórios da Agência Nacional de Mineração (ANM). Pontos analisados: 1, 37 e 39;
- Suíte São Miguel, representada por granitos monzograníticos, cujos solos associados apresentam anomalias de tório (Th). Pontos analisados: 26 e 36;
- Suíte Dr. Severiano, constituída por rochas básicas com presença significativa de apatita e epidoto hidrotermal, minerais reconhecidos como potenciais hospedeiros de ETRs. Foram analisadas amostras dos dioritos da Suíte Dr. Severiano (pontos 28 e 34) e do plúton diorítico Poço Dantas (pontos 41 e 42).

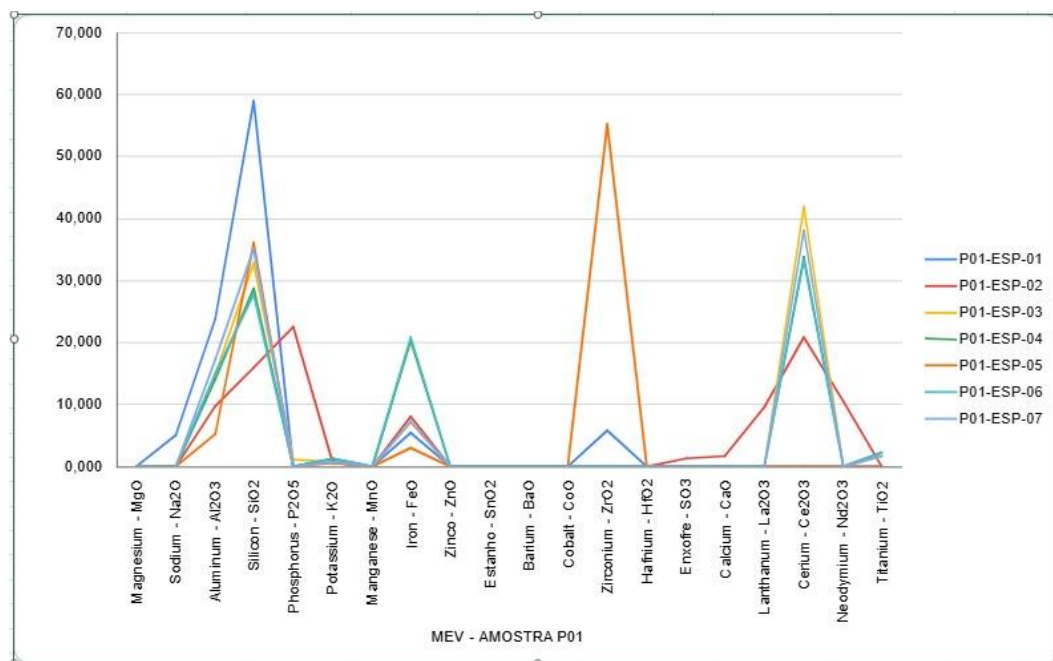
Os resultados geoquímicos obtidos a partir dessas análises são apresentados e discutidos nas figuras subsequentes.

5.1 Augen Gnaiss Serra do Deserto

A Figura 9 apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 1, correspondentes ao solo derivado do augen gnaisse, na fração granulométrica < 0,125 mm. Os resultados indicam variações significativas nos teores dos principais óxidos

analisados. O SiO_2 apresenta valores entre 27,71% e 58,85%, enquanto o Al_2O_3 varia de 5,27% a 23,74%, refletindo a contribuição de fases silicáticas e aluminossilicáticas.

Figura 9 - Valores obtidos EDS em óxidos para solo do augen gnaisse, fração <0,125mm, Ponto 1.



Fonte: Autor (2026).

Além disso, o P_2O_5 apresenta teores expressivos, variando de 1,10% a 22,37%, sugerindo a presença de minerais fosfatados, possivelmente associados à monazita ou apatita. O FeO^t varia entre 2,92% e 20,69%, indicando contribuição de fases máficas e óxidos de ferro. Observam-se ainda valores elevados de ZrO_2 , entre 5,83% e 55,19%, compatíveis com a presença de zircão.

No que se refere aos ETR's, destacam-se os teores de La_2O_3 (9,44%), Ce_2O_3 , com variação entre 20,73% e 41,83%, e Nd_2O_3 (10,39%), evidenciando enriquecimento significativo em ETRs leves. O TiO_2 apresenta valores entre 1,63% e 2,23%, possivelmente associados à presença de titanita ou ilmenita.

Esses resultados indicam que o solo derivado do augen gnaisse da Suíte Serra do Deserto apresenta assinatura geoquímica favorável à concentração de ETRs, especialmente de elementos leves, associados

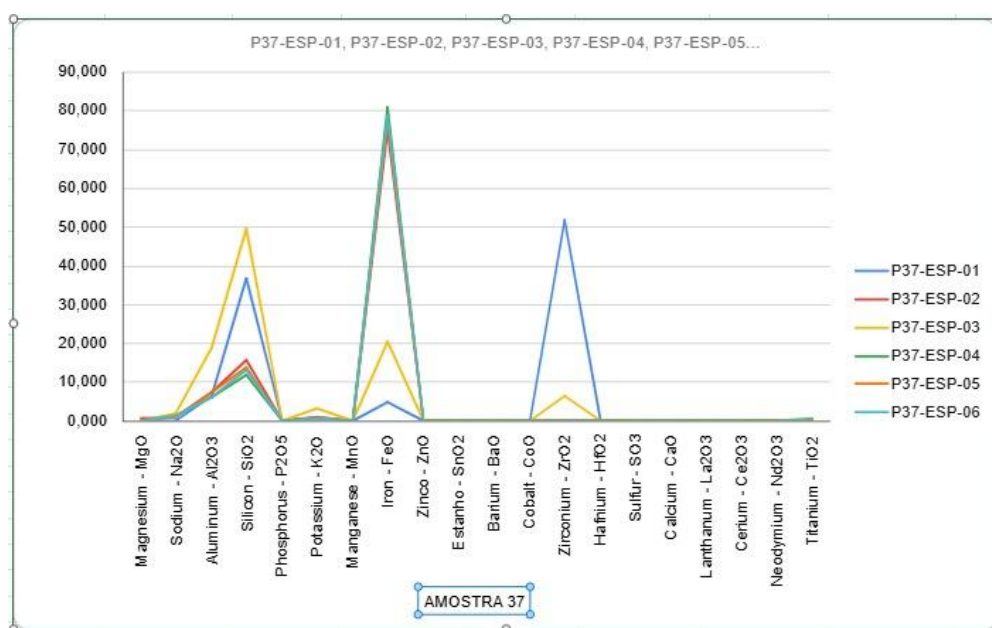
A Figura 10 apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 37, correspondentes ao solo derivado do augen gnaisse, na fração granulométrica < 0,125

mm. Os dados obtidos evidenciam variações significativas nos teores dos principais óxidos analisados. O SiO_2 apresenta valores entre 11,76% e 49,49%, enquanto o Al_2O_3 varia de 6,14% a 18,82%, refletindo a contribuição de fases silicáticas e aluminossilicáticas associadas ao intemperismo da rocha-mãe.

O K_2O ocorre em teores relativamente baixos, variando de 0,46% a 3,15%, indicando participação limitada de feldspatos potássicos ou micas potássicas nas áreas analisadas. O FeO^t apresenta ampla variação, com valores entre 4,55% e 80,64%, sugerindo concentração expressiva de fases ricas em ferro, possivelmente relacionadas à presença de óxidos e hidróxidos de ferro secundários ou minerais máficos resistentes. Observam-se ainda teores elevados de ZrO_2 , variando de 6,38% a 51,71%, compatíveis com a ocorrência de zircão, mineral acessório frequentemente associado ao enriquecimento em elementos terras raras.

Esses resultados reforçam a heterogeneidade geoquímica do solo derivado do augen gnaisse no Ponto 37 e indicam condições favoráveis à concentração residual de minerais acessórios portadores de ETRs, especialmente em frações granulométricas mais finas.

Figura 10 - Valores obtidos EDS em óxidos para solo do augen gnaisse, fração <0,125mm, Ponto 37.



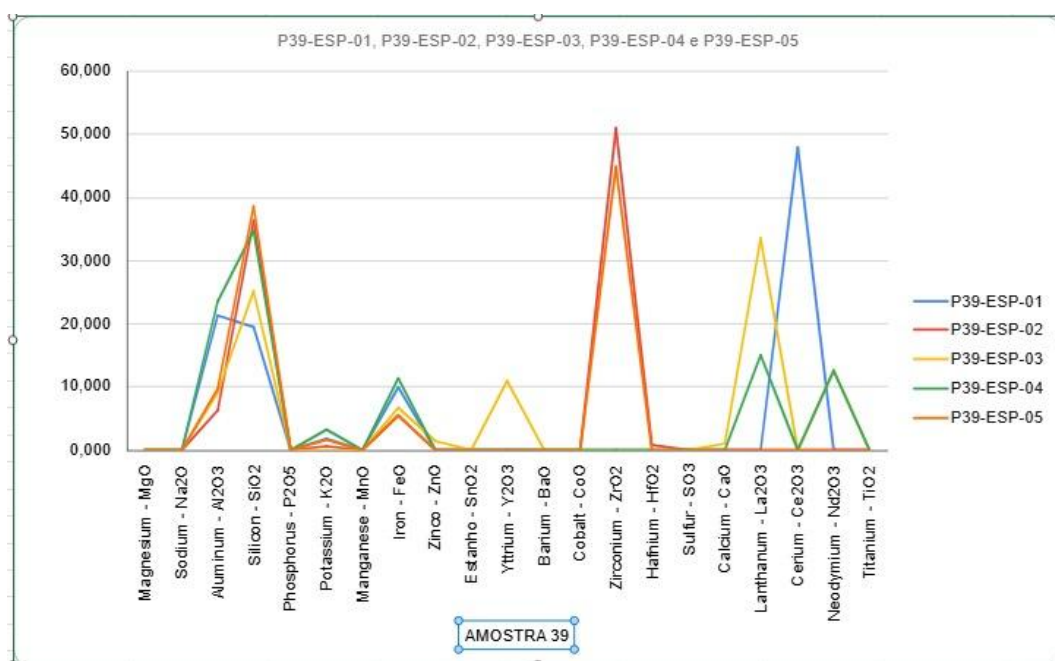
Fonte: Autor (2026).

Esses resultados reforçam a heterogeneidade geoquímica do solo derivado do augen gnaisse no Ponto 37 e indicam condições favoráveis à concentração residual de minerais acessórios portadores de ETRs, especialmente em frações granulométricas mais finas.

Já a Figura 11, apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 39, correspondentes ao solo derivado do augen gnaisse, na fração granulométrica <0,125 mm. Os dados revelam variações nos teores dos principais óxidos analisados, com o SiO_2 apresentando valores entre 19,32% e 38,52% e o Al_2O_3 variando de 6,31% a 23,46%, refletindo a contribuição de fases silicáticas e aluminossilicáticas associadas ao intemperismo da rocha fonte.

O K_2O apresenta teores moderados, entre 1,60% e 3,19%, indicando a presença residual de minerais potássicos, como feldspatos e micas. O FeO^t varia de 5,33% a 11,30%, sugerindo participação de minerais máficos e de óxidos e hidróxidos de ferro secundários. Registra-se ainda a presença pontual de ZnO (1,45%) e CaO (0,93%), possivelmente associados a fases acessórias ou a processos de alteração hidrotermal.

Figura 11 - Valores obtidos EDS em óxidos para solo do augen gnaisse, fração < 0,125mm, Ponto 39.



Fonte: Autor (2026).

Destacam-se os elevados teores de ZrO_2 , variando de 44,86% a 50,78%, acompanhados por HfO_2 (0,74%), evidenciando a concentração de zircão como fase resistente ao intemperismo. Observa-se também enriquecimento expressivo em elementos terras raras, com teores de Y_2O_3 (10,94%), La_2O_3 variando de 14,86% a 33,32%, Ce_2O_3 (47,73%) e Nd_2O_3 (12,57%), indicando predominância de ETRs leves, associadas possivelmente a minerais acessórios como monazita e allanita.

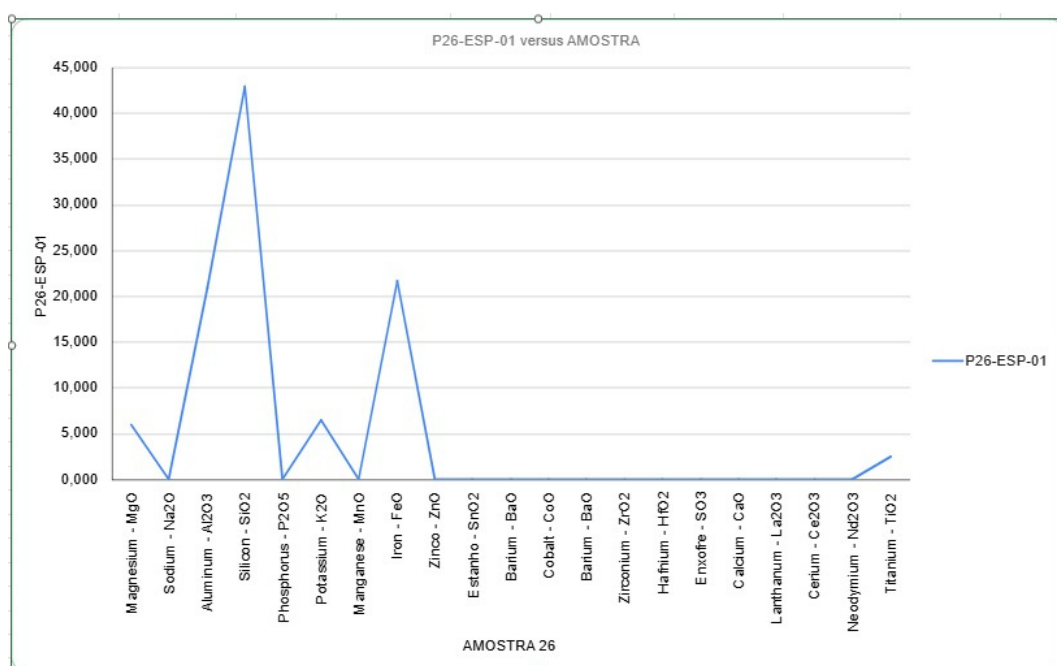
Esses resultados evidenciam que o solo derivado do augen gnaisse no Ponto 39 apresenta assinatura geoquímica fortemente enriquecida em ETRs, particularmente em elementos leves, além de minerais resistentes como zircão, sugerindo processos de concentração residual supergênica atuando sobre a rocha-mãe.

Das 3 amostras de solo do augen gnaisse analisadas duas, Ponto 1 e Ponto 39, foram detectados ETR's como Y, La, Ce, Nd, Hf. Estas anomalias foram detectadas em partículas escolhidas no imageamento da amostra. São partículas de alta reflectância e por isso alguns teores são elevados pois representam possíveis alanitas, zircões, métálicos ricos em Nd e La.

5.2 Suíte São Miguel

A Figura 12 apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 26, correspondentes ao solo derivado da Suíte São Miguel, na fração granulométrica $< 0,125$ mm. A composição química é marcada por teores elevados de SiO_2 (42,84%) e Al_2O_3 (20,87%), indicando forte contribuição de fases silicáticas e aluminossilicáticas, típicas de solos desenvolvidos a partir de rochas graníticas.

Figura 12 - Valores obtidos EDS em óxidos para solo da Suíte São Miguel, fração < 0,125mm, Ponto 26.

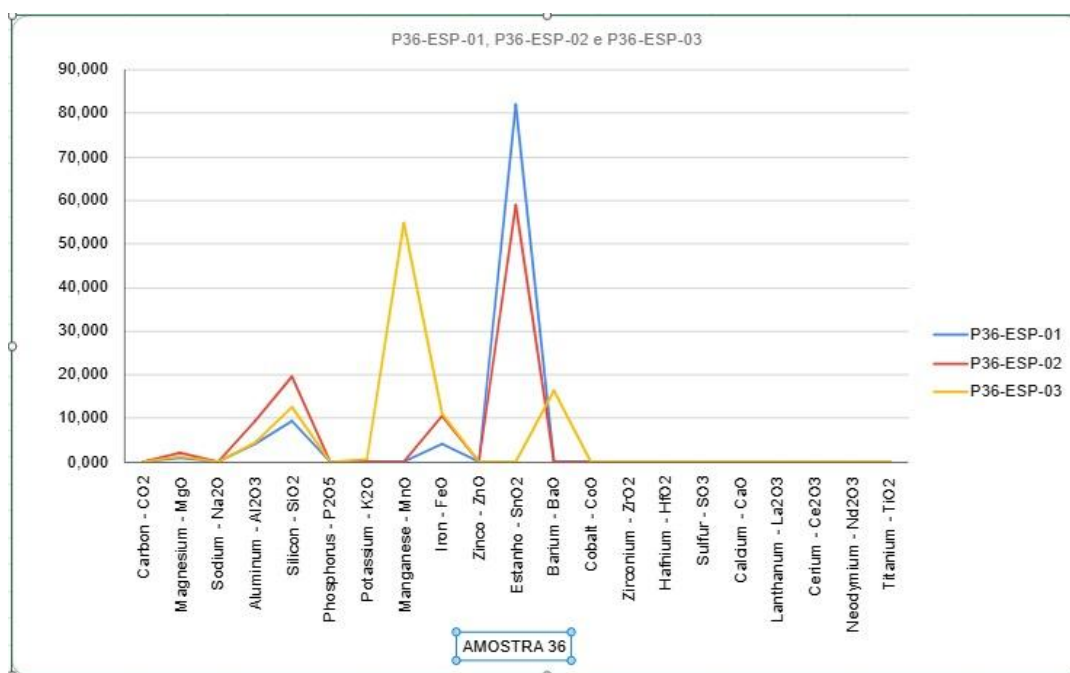


Fonte: Autor (2026).

O K_2O (6,37%) apresenta valores relativamente elevados, compatíveis com a presença de feldspatos potássicos e micas na fração analisada. O MgO (5,88%) e o FeO^t (21,55%) sugerem a participação significativa de minerais máficos e de óxidos e hidróxidos de ferro, possivelmente associados a processos de intemperismo e concentração residual. O TiO_2 (2,47%) indica a presença de minerais acessórios ricos em titânio, como ilmenita ou titanita.

A Figura 13 apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 36, correspondentes ao solo derivado da Suíte São Miguel, na fração granulométrica < 0,125 mm. Os resultados evidenciam composição geoquímica contrastante em relação a outros pontos da mesma unidade, com baixos teores de SiO_2 , variando de 9,11% a 19,53%, e de Al_2O_3 , entre 4,19% e 9,13%, indicando contribuição reduzida de fases silicáticas e aluminossilicáticas.

Figura 13 - Valores obtidos EDS em óxidos para solo da Suíte São Miguel, fração < 0,125mm, Ponto 36.



Fonte: Autor (2026).

Os teores de MgO variam de 1,08% a 1,96%, enquanto o FeO^t apresenta valores entre 4,02% e 10,91%, sugerindo participação moderada de minerais máficos e de óxidos de ferro. Destaca-se o teor extremamente elevado de MnO (54,64%), indicando forte concentração de fases manganíferas, possivelmente associadas a processos supergênicos ou à presença de óxidos e hidróxidos de manganês no solo.

Outro aspecto relevante é o enriquecimento expressivo em SnO₂, com valores variando de 58,87% a 81,81%, sugerindo a presença concentrada de cassiterita como fase resistente ao intemperismo. Registra-se ainda a ocorrência de BaO (16,25%), possivelmente associada a minerais bariados ou a processos hidrotermais prévios que enriqueceram localmente o substrato.

Esses resultados indicam que o solo do Ponto 36 apresenta assinatura geoquímica fortemente anômala, marcada pela concentração residual de minerais pesados e resistentes, refletindo processos de intemperismo diferencial e enriquecimento supergênico, distintos do padrão geoquímico típico dos solos derivados dos granitos da Suíte São Miguel.

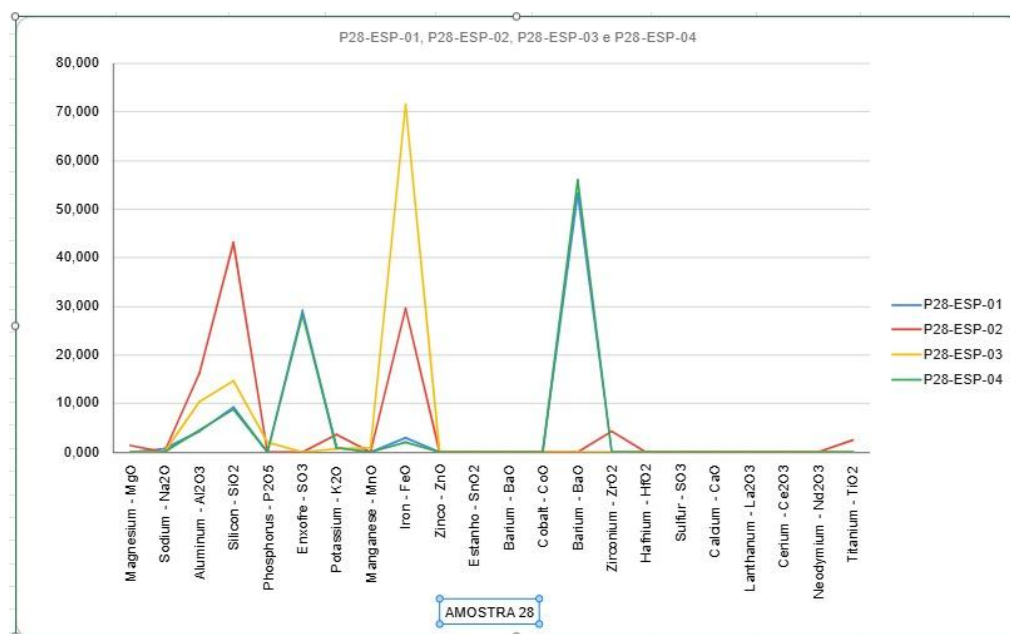
Dessa forma, nas duas amostras analisadas da Suíte São Miguel, representada por um monzogranito equigranular, não foram detectados ETR's por meio das análises

realizadas. Em contrapartida, foram identificadas partículas ricas em estanho, bem como a presença de bário, elemento comumente associado a rochas graníticas. Esses resultados indicam que, apesar da ausência de enriquecimento em ETRs, a unidade apresenta assinaturas geoquímicas compatíveis com processos magmáticos e pós-magmáticos típicos de granitos, incluindo a concentração localizada de elementos metálicos como o estanho.

5.3 Suíte Dr. Severiano (Dioritos Dr. Severiano)

A Figura 14 apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 28, correspondentes ao solo derivado do diorito da Suíte Dr. Severiano, na fração granulométrica $< 0,125$ mm. Os dados obtidos revelam elevada heterogeneidade geoquímica, refletindo a diversidade mineralógica e os processos supergênicos atuantes sobre a rocha-mãe.

Figura 14 - Valores obtidos EDS em óxidos para solo dos dioritos Dr. Severiano, fração $< 0,125$ mm, Ponto 28.



Fonte: Autor (2026).

Os teores de SiO_2 variam amplamente, entre 8,78% e 42,98%, enquanto o Al_2O_3 apresenta valores de 4,50% a 16,15%, indicando contribuição variável de fases silicáticas e aluminossilicáticas. O MgO ($\approx 1,19\%$) ocorre em baixos teores, compatível

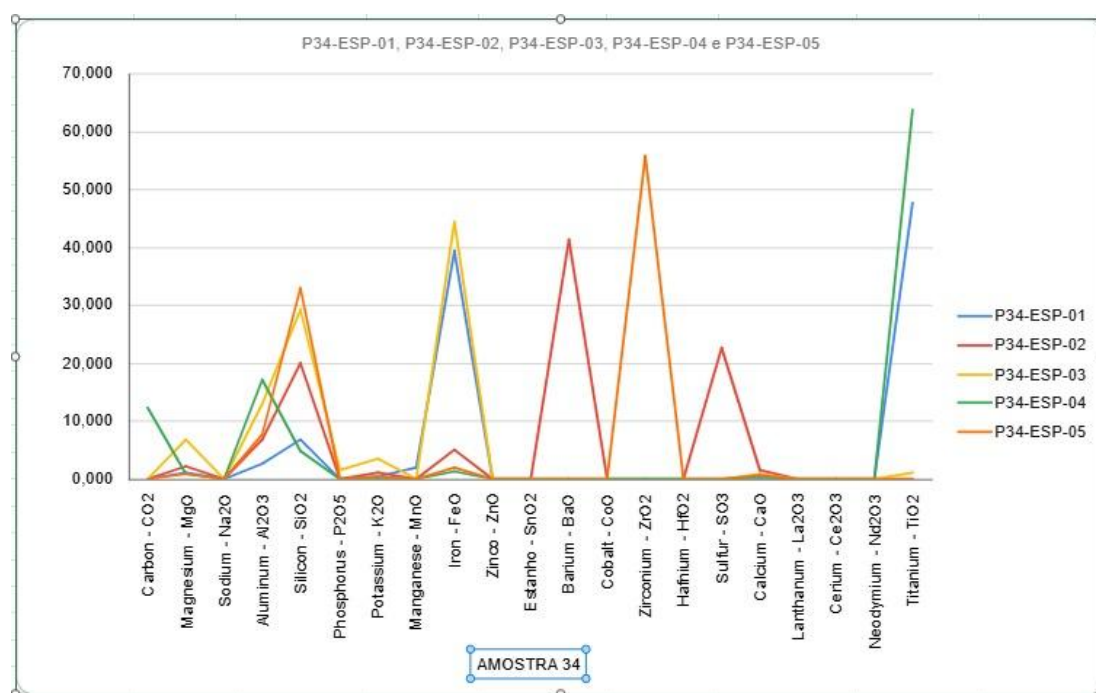
com a participação restrita de minerais máficos primários. O K_2O varia de 0,76% a 3,57%, sugerindo presença subordinada de minerais potássicos.

Destacam-se os elevados teores de SO_3 , variando de 28,11% a 28,95%, possivelmente associados à presença de fases sulfatadas secundárias formadas durante processos de alteração. O FeO^t apresenta variação expressiva, entre 1,90% e 71,35%, indicando forte concentração de óxidos e hidróxidos de ferro, comuns em solos desenvolvidos sobre rochas máficas.

Observam-se ainda teores elevados de BaO , variando de 53,22% a 55,92%, sugerindo a concentração de fases ricas em bário, possivelmente relacionadas a minerais bariados ou a processos hidrotermais prévios. O ZrO_2 (4,25%) indica presença subordinada de zircão, enquanto o TiO_2 (2,33%) sugere contribuição de minerais acessórios ricos em titânio, como ilmenita ou titanita.

A Figura 15 apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 34, correspondentes ao solo derivado do diorito da Suíte Dr. Severiano, na fração granulométrica $< 0,125$ mm. Os dados evidenciam ampla variação nos teores dos principais óxidos, indicando elevada heterogeneidade geoquímica associada aos processos de intemperismo e à mineralogia da rocha-mãe.

Figura 15 - Valores obtidos EDS em óxidos para solo do diorito Dr. Severiano, fração $< 0,125$ mm, Ponto 34.



Fonte: Autor (2026).

O SiO_2 apresenta valores entre 4,87% e 32,82%, enquanto o Al_2O_3 varia de 2,63% a 17,08%, refletindo contribuição variável de fases silicáticas e aluminossilicáticas. O MgO oscila entre 0,84% e 6,77%, indicando participação subordinada de minerais máficos primários, enquanto o K_2O apresenta baixos teores, entre 0,36% e 3,35%, compatíveis com a presença restrita de minerais potássicos.

O FeO^t varia amplamente, de 1,26% a 44,40%, sugerindo concentração significativa de óxidos e hidróxidos de ferro no solo. Destaca-se ainda a presença de BaO (41,31%), indicando enriquecimento em fases bariadas, possivelmente relacionadas a processos hidrotermais ou à concentração residual de minerais acessórios. O ZrO_2 (55,69%) revela forte concentração de zircão, mineral resistente ao intemperismo e potencial hospedeiro de elementos traço.

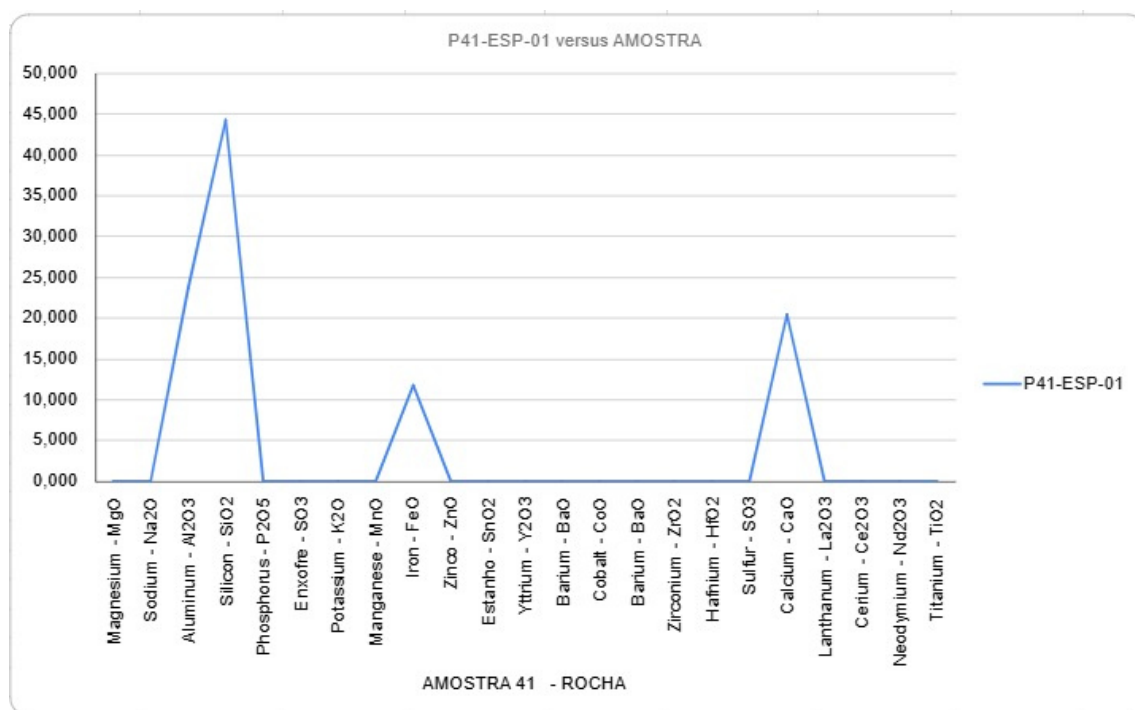
Observam-se também teores expressivos de SO_3 (22,50%), associados à presença de fases sulfatadas secundárias, além de CaO , variando de 0,68% a 1,43%, possivelmente vinculado a minerais cálcicos acessórios ou a produtos de alteração. O TiO_2 apresenta variação extremamente elevada, entre 1,00% e 63,70%, indicando concentração significativa de minerais ricos em titânio, como ilmenita e titanita, compatível com a mineralogia observada nas rochas dioríticas da Suíte Dr. Severiano.

Assim, nas duas amostras analisadas da Suíte Dr. Severiano, representadas pelos dioritos Dr. Severiano, não foram identificadas anomalias de elementos terras raras (ETRs) por meio das análises realizadas. Em contrapartida, foi registrada a presença de partículas ricas em bário, indicando enriquecimento localizado desse elemento, comumente associado a fases acessórios ou a processos hidrotermais em rochas máficas a intermediárias.

5.4 Diorito Pluton Poço Dantas

A Figura 16 apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 41, correspondentes à rocha fortemente epidotizada. A composição química é caracterizada por teores elevados de SiO_2 (44,29%) e Al_2O_3 (23,63%), refletindo a contribuição de fases silicáticas e aluminossilicáticas, além de alterações hidrotermais associadas ao processo de epidotização.

Figura 16 - Valores obtidos EDS em óxidos para diorito Poço Dantas epidotizado, Ponto 41.

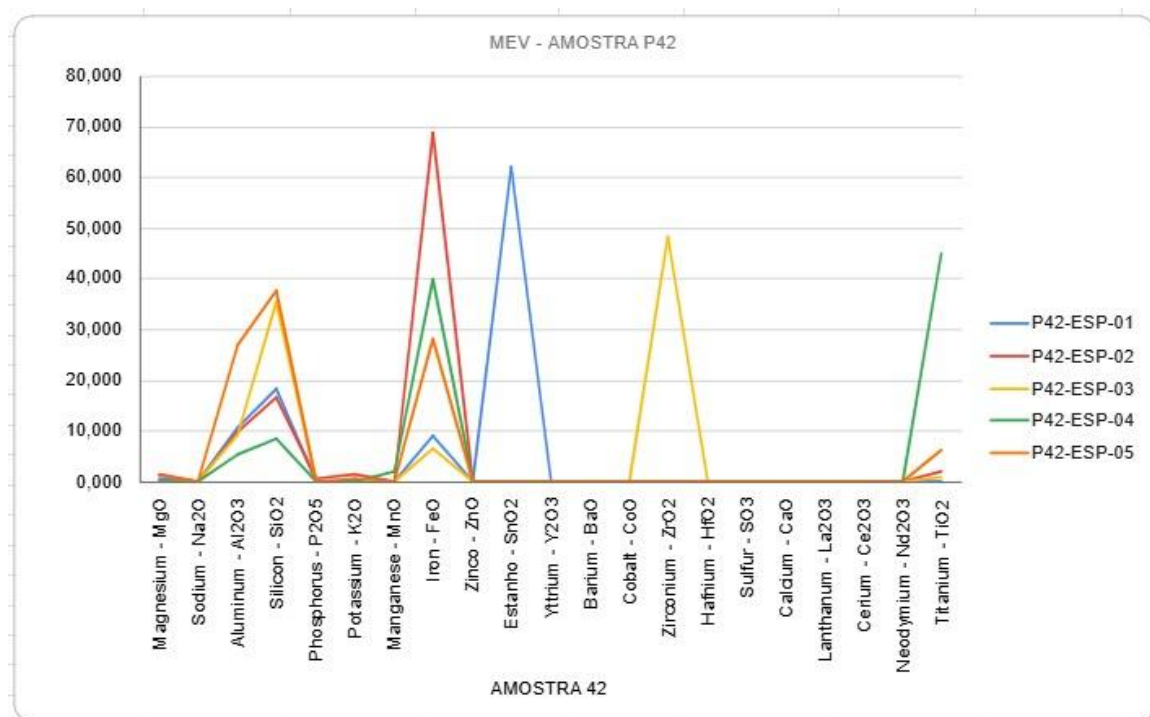


Fonte: Autor (2026).

O FeO^t (11,62%) indica participação significativa de minerais ferromagnesianos e de óxidos de ferro secundários, enquanto o CaO (20,45%) apresenta valor expressivo, compatível com a abundância de epidoto, mineral cálcico típico de sistemas hidrotermais. Esses resultados corroboram as observações petrográficas de intenso hidrotermalismo no Ponto 41, reforçando a interpretação de que a epidotização exerceu papel relevante na modificação da composição original da rocha.

A Figura 17 apresenta os resultados das análises EDS realizadas no Ponto 42, correspondentes ao solo derivado do diorito do Plúton Poço Dantas, na fração granulométrica < 0,125 mm. Os dados revelam ampla variação nos teores dos principais óxidos analisados, indicando elevada heterogeneidade geoquímica associada aos processos de intemperismo e à mineralogia da rocha-mãe.

Figura 17 - Valores obtidos EDS em óxidos para solo do diorito Poço Dantas epidotizado, Ponto 42.



Fonte: Autor (2026).

O SiO_2 apresenta valores entre 8,26% e 37,47%, enquanto o Al_2O_3 varia de 5,19% a 26,86%, refletindo contribuição variável de fases silicáticas e aluminossilicáticas. O K_2O ocorre em baixos teores, entre 0,46% e 1,22%, sugerindo participação subordinada de minerais potássicos na fração analisada. Registra-se ainda a presença pontual de MnO (1,84%), possivelmente associada a fases manganésíferas secundárias.

O FeO^t apresenta ampla variação, entre 6,37% e 68,68%, indicando forte concentração de óxidos e hidróxidos de ferro no solo, característica comum em perfis de alteração desenvolvidos sobre rochas máficas. Destacam-se teores elevados de SnO_2 (61,89%), sugerindo a presença concentrada de cassiterita como mineral resistente ao intemperismo. Observam-se também valores expressivos de ZrO_2 (48,20%), indicativos de concentração de zircão, além de TiO_2 , com variação entre 0,87% e 44,75%, compatível com a presença de minerais ricos em titânio, como ilmenita e titanita.

Nas duas amostras analisadas do Plúton Poço Dantas, correspondentes à rocha epidotizada (Ponto 41) e ao solo derivado dessa mesma rocha (Ponto 42), não

foram detectadas anomalias de ETRs por meio das análises realizadas. Em contrapartida, foi identificada a presença de estanho, indicando concentração pontual desse elemento. Os teores elevados de cálcio observados nas análises refletem diretamente os processos de epidotização que afetaram a rocha, corroborando as evidências petrográficas de intenso hidrotermalismo nessa unidade.

5.5 Resultados correspondentes às frações peneiras ASTM 120 e ASTM 80

Os resultados apresentados a seguir consideram a análise conjunta de dados provenientes de dois experimentos distintos, correspondentes às frações peneiras ASTM 120 e ASTM 80, com o objetivo de avaliar o comportamento composicional global.

Cabe ressaltar que nem todas as amostras possuem dados oriundos das duas peneiras. As amostras AM P01 e AM P36 incluem análises realizadas tanto na fração ASM 80 quanto na ASM 120, enquanto as demais amostras contam exclusivamente com dados da fração ASM 120. Essa assimetria entre os conjuntos deve ser considerada na interpretação dos resultados, uma vez que a combinação de frações distintas pode influenciar os níveis de variabilidade observados.

Além disso, o conjunto de dados reúne informações obtidas a partir de diferentes níveis de observação. Parte das análises corresponde a pontos de tiro individuais, nos quais a composição química foi determinada em regiões específicas da amostra. Paralelamente, estão incluídos dados representativos de lâminas em solo, que refletem uma integração composicional mais ampla do material analisado. A junção desses dois tipos de informação amplia a heterogeneidade do banco de dados, mas permite uma visão global da variabilidade composicional presente nas amostras.

Destaca-se ainda que a amostra AM P41 difere das demais por corresponder a uma lâmina de rocha, e não a uma lâmina em solo. Essa particularidade implica um contexto amostral distinto, que pode refletir-se em padrões composicionais e de variabilidade próprios quando comparados às demais amostras do conjunto.

Vale ressaltar que nos gráficos de *boxplot* e nos mapas de calor, os registros associados às lâminas foram identificados por meio de uma nomenclatura simplificada. As amostras originalmente descritas com a indicação completa do tipo de material, como P01-ESP-01 LÂMINA SOLO, foram representadas nos elementos gráficos como P01-ESP-01-LS, em que a sigla LS corresponde a Lâmina de Solo.

Essa padronização foi adotada com o objetivo de facilitar a leitura e a organização visual dos gráficos, sem prejuízo à correta identificação do tipo de amostra analisada.

5.5.1 Amostra AM P01

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas dos óxidos analisados na amostra AM P01. Observa-se que a composição média da amostra é dominada por SiO₂ (36,58%) e Al₂O₃ (15,94%), os quais apresentam coeficientes de variação próximos de 39%. Esses valores indicam que esses óxidos mantêm uma distribuição relativamente estável entre os diferentes registros.

O Ce₂O₃ (13,96%) e o FeO (12,75%) também apresentam médias elevadas, porém associados a coeficientes de variação significativamente maiores (128,28% e 93,78%, respectivamente). Esse comportamento evidencia que, embora esses óxidos contribuam de forma relevante para a composição média, sua distribuição é marcada por forte heterogeneidade, com concentrações elevadas restritas a subconjuntos específicos dos dados.

Os demais óxidos exibem, em sua maioria, coeficientes de variação extremamente elevados, frequentemente superiores a 200%, como observado para MgO, Na₂O, P₂O₅, BaO, ZrO₂, SO₃, CaO, La₂O₃ e Nd₂O₃. Nesses casos, os desvios-padrão superam amplamente as médias, indicando distribuições altamente assimétricas, caracterizadas pela predominância de valores baixos ou nulos e pela ocorrência pontual de valores elevados.

Esse padrão estatístico reflete a heterogeneidade do conjunto de dados, tornando a média uma medida limitada para a descrição desses óxidos. Assim, para a amostra AM P01, a análise descritiva evidencia a coexistência de uma matriz composicional relativamente estável, definida principalmente por SiO₂ e Al₂O₃, com um conjunto de componentes cuja principal característica é a elevada variabilidade interna.

Tabela 1 – Média, desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P01

Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
MgO	0,30	0,86	283,75
Na ₂ O	0,48	1,46	302,87
Al ₂ O ₃	15,94	6,20	38,88

SiO₂	36,58	14,24	38,93
P₂O₅	1,96	6,44	329,08
K₂O	1,52	1,08	71,26
MnO	0,00	0,00	–
FeO^t	12,75	11,96	93,78
ZnO	0,00	0,00	–
SnO₂	0,00	0,00	–
BaO	5,84	14,01	239,69
CoO	0,00	0,00	–
ZrO₂	5,09	15,87	312,05
HfO₂	0,00	0,00	–
SO₃	3,13	7,17	229,17
CaO	0,14	0,49	346,41
La₂O₃	0,79	2,73	346,41
Ce₂O₃	13,96	17,90	128,28
Nd₂O₃	0,87	3,00	346,41
TiO₂	0,64	0,97	150,66

Fonte: Autor (2026).

A Figura 18 correspondente aos *boxplots* da amostra AM P01 permite uma leitura detalhada da dispersão e da assimetria dos óxidos. Os óxidos SiO₂ e Al₂O₃ apresentam caixas relativamente bem definidas, com medianas posicionadas próximas ao centro da distribuição e intervalos interquartílicos moderados. Esse comportamento confirma que esses componentes constituem a base composicional da amostra, mantendo distribuição relativamente contínua.

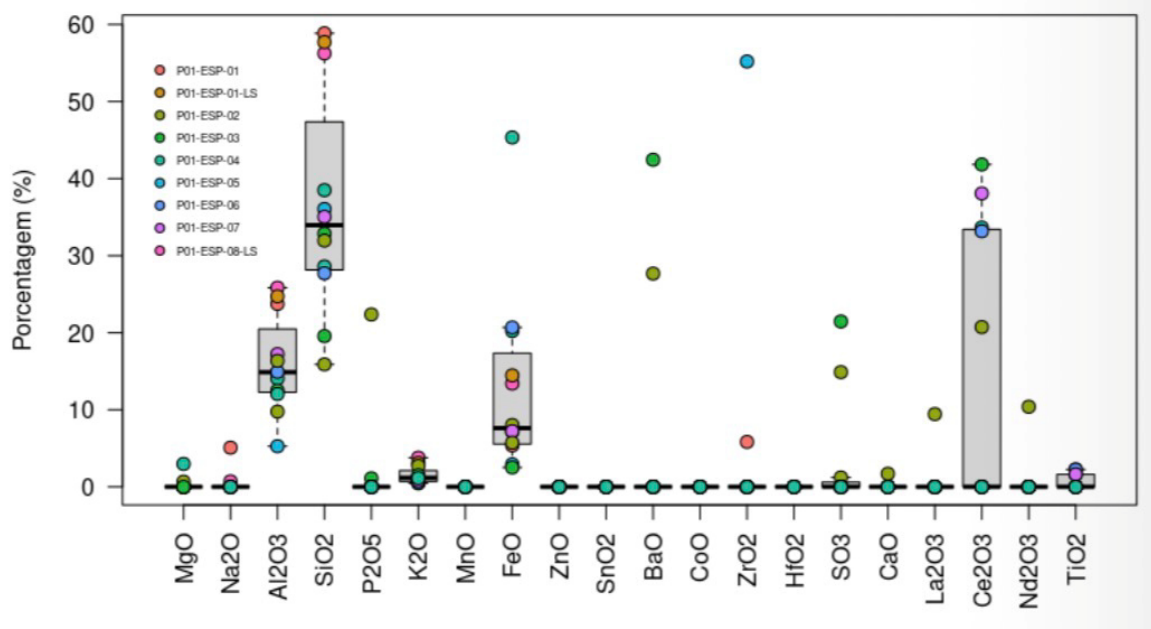
O FeO exibe uma dispersão significativamente maior, com caixa ampla e presença de valores elevados afastados da mediana, indicando forte variabilidade entre os diferentes registros. A assimetria observada sugere que concentrações elevadas de ferro estão associadas a subconjuntos específicos dos dados, possivelmente relacionado ao determinado ponto de tiro (P01-ESP-05).

O Ce₂O₃ destaca-se por apresentar uma distribuição altamente assimétrica, com mediana próxima de valores baixos e ocorrência de valores extremos elevados. Esse padrão indica que o enriquecimento em terras raras não é homogêneo, sendo controlado por contribuições localizadas dentro da amostra.

Os demais óxidos, como MgO, Na₂O, P₂O₅, BaO, ZrO₂, SO₃, CaO e TiO₂, apresentam caixas comprimidas próximas a zero, acompanhadas por pontos isolados em níveis mais elevados. Esse comportamento reforça a interpretação de distribuições esparsas, nas quais poucos registros dominam a variabilidade observada. De modo geral, os *boxplots* confirmam que a amostra AM P01 é

caracterizada por uma matriz composicional relativamente estável, dominada por SiO_2 e Al_2O_3 , coexistindo com óxidos de comportamento altamente heterogêneo.

Figura 18 – *Boxplot* dos óxidos – amostra PO1



Fonte: Autor (2026).

O mapa de calor da Figura 19 da amostra AM P01 permite visualizar de forma integrada a distribuição espacial relativa dos óxidos entre os diferentes pontos de análise e as lâminas associadas. A variação de intensidade cromática evidencia padrões que não são imediatamente perceptíveis a partir das estatísticas de resumo.

Observa-se que o SiO_2 apresenta coloração intensa e relativamente homogênea ao longo da maioria dos registros, tanto nos pontos quanto nas lâminas de solo (LS). Esse padrão confirma seu papel dominante na composição da amostra e indica que sua contribuição é estruturalmente consistente, independentemente do tipo de análise considerado.

O Al_2O_3 também exibe distribuição contínua, porém com variações moderadas de intensidade entre os registros. Nota-se um leve enriquecimento em alguns pontos específicos, sugerindo heterogeneidade interna, embora sem ruptura clara da matriz composicional principal.

O FeO apresenta comportamento distinto, caracterizado por contrastes marcantes de intensidade ao longo das linhas. Registros associados as lâminas e a determinados pontos exibem valores significativamente mais elevados, enquanto

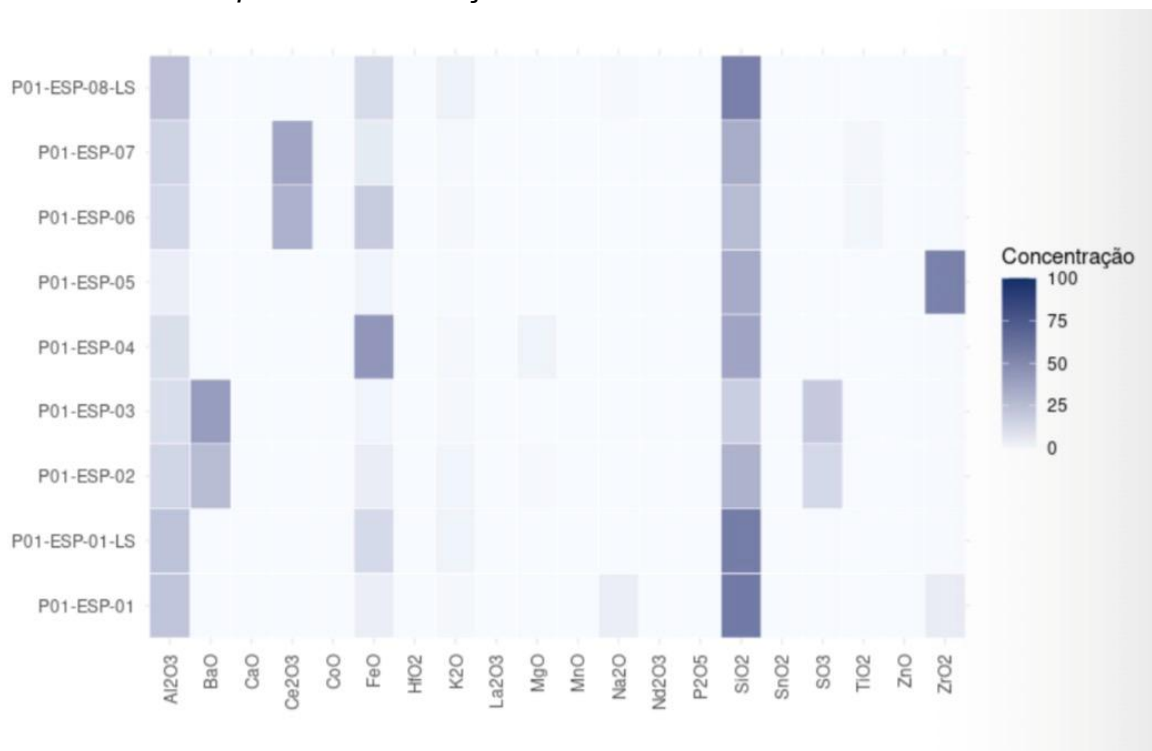
outros permanecem próximos a níveis baixos. Esse padrão reforça a interpretação de que o ferro está concentrado em domínios específicos da amostra, contribuindo de forma decisiva para a heterogeneidade observada.

O Ce_2O_3 destaca-se por apresentar coloração intensa apenas em subconjuntos restritos dos dados, com ampla ausência nos demais registros. Essa distribuição pontual indica que o enriquecimento em terras raras não é generalizado, mas associado a regiões específicas, o que explica a elevada dispersão observada nas análises estatísticas.

Os óxidos MgO , Na_2O , P_2O_5 , BaO , ZrO_2 , SO_3 , CaO e TiO_2 , exibem majoritariamente coloração fraca ou ausente, intercalada por poucos registros com intensificação pontual. Esse padrão é consistente com uma distribuição esparsa, dominada por valores baixos e ocorrência ocasional de enriquecimentos localizados.

De forma integrada, o mapa de calor evidencia que a amostra AM P01 é composta por uma matriz relativamente estável dominada por SiO_2 e Al_2O_3 , sobre a qual se sobrepõem contribuições localizadas de FeO , Ce_2O_3 e demais óxidos.

Figura 19 – *Heatmap* das concentrações de óxidos da amostra AM P01



Fonte: Autor (2026).

5.5.2 Amostra AM P26

A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas dos óxidos analisados na amostra AM P26. O SiO constitui o principal componente da amostra, com média de 48,08% e coeficiente de variação relativamente baixo (15,41%). Esse comportamento indica elevada homogeneidade entre os registros analisados, tornando a média uma medida estatística representativa e sugerindo uma matriz silicática bem definida e consistente.

O Al₂O₃ também apresenta contribuição significativa (24,44%) e baixo coeficiente de variação (20,62%), reforçando a presença de uma matriz composicional estável dominada por óxidos maiores. A combinação de SiO₂ e Al₂O₃ responde por mais de 70% da composição média, indicando que a estrutura química da amostra é fortemente controlada por esses dois componentes.

O MnO surge como um constituinte relevante, com média de 17,63% e coeficiente de variação moderado (31,50%). Embora apresente maior dispersão em comparação aos óxidos majoritários, sua distribuição ainda é relativamente consistente, sugerindo que o manganês participa de forma recorrente da composição da amostra, e não apenas como enriquecimento pontual.

O MgO e o SO exibem médias mais baixas (3,61% e 4,22%, respectivamente), associadas a coeficientes de variação elevados, sobretudo para o SO₃ (72,09%). Esse padrão indica maior sensibilidade desses óxidos à heterogeneidade local, com flutuações mais acentuadas entre os registros.

O Nd₂O₃, embora presente em menor proporção (2,02%), apresenta coeficiente de variação moderado (31,46%), sugerindo ocorrência relativamente regular dentro do conjunto analisado, ainda que com contribuição limitada à composição total.

Os demais óxidos não foram detectados ou apresentaram valores nulos em todos os registros, indicando ausência estatística ou concentrações abaixo do limite de detecção para a amostra AM P26.

De forma geral, a amostra AM P26 destaca-se por apresentar um dos padrões mais homogêneos do conjunto analisado, caracterizado por baixa dispersão dos óxidos majoritários e menor influência de enriquecimentos pontuais. Essa estabilidade composicional contrasta com amostras marcadas por elevada variabilidade e reforça a interpretação de uma matriz química bem definida.

Ressalta-se que as interpretações estatísticas da amostra AM P26 devem ser realizadas com cautela, uma vez que cada óxido é representado por apenas dois registros experimentais. Esse número reduzido de observações limita a confiabilidade das medidas de dispersão, como o desvio-padrão e o coeficiente de variação, podendo levar a estimativas superdimensionadas ou pouco representativas da variabilidade real do material. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser entendidos como indicativos do comportamento composicional da amostra, não substituindo análises baseadas em conjuntos amostrais mais robustos.

Tabela 2 – Média, desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos –
Amostra AM P26

Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
MgO	3,6070	3,2145	89,12
Na₂O	0,0000	0,0000	–
Al₂O₃	24,4375	5,0381	20,62
SiO₂	48,0825	7,4112	15,41
P₂O₅	0,0000	0,0000	–
SO₃	4,2225	3,0441	72,09
K₂O	0,0000	0,0000	–
MnO	17,6305	5,5543	31,50
FeO^t	0,0000	0,0000	–
ZnO	0,0000	0,0000	–
SnO₂	0,0000	0,0000	–
BaO	0,0000	0,0000	–
CoO	0,0000	0,0000	–
ZrO₂	0,0000	0,0000	–
HfO₂	0,0000	0,0000	–
CaO	0,0000	0,0000	–
La₂O₃	0,0000	0,0000	–
Ce₂O₃	0,0000	0,0000	–
Nd₂O₃	2,0205	0,6357	31,46

Fonte: Autor (2026).

A figura 20 está mapa de calor da amostra AM P26 permite uma comparação direta entre os dois registros analisados (P26-ESP-01 e P26-ESP-02-lâmina de solo), evidenciando tanto os óxidos dominantes quanto as diferenças relativas de concentração entre os pontos. Observa-se que a composição é fortemente controlada por SiO₂ e Al₂O₃, que apresentam intensidades elevadas e relativamente semelhantes nos dois registros, indicando que esses óxidos definem a matriz composicional básica da amostra.

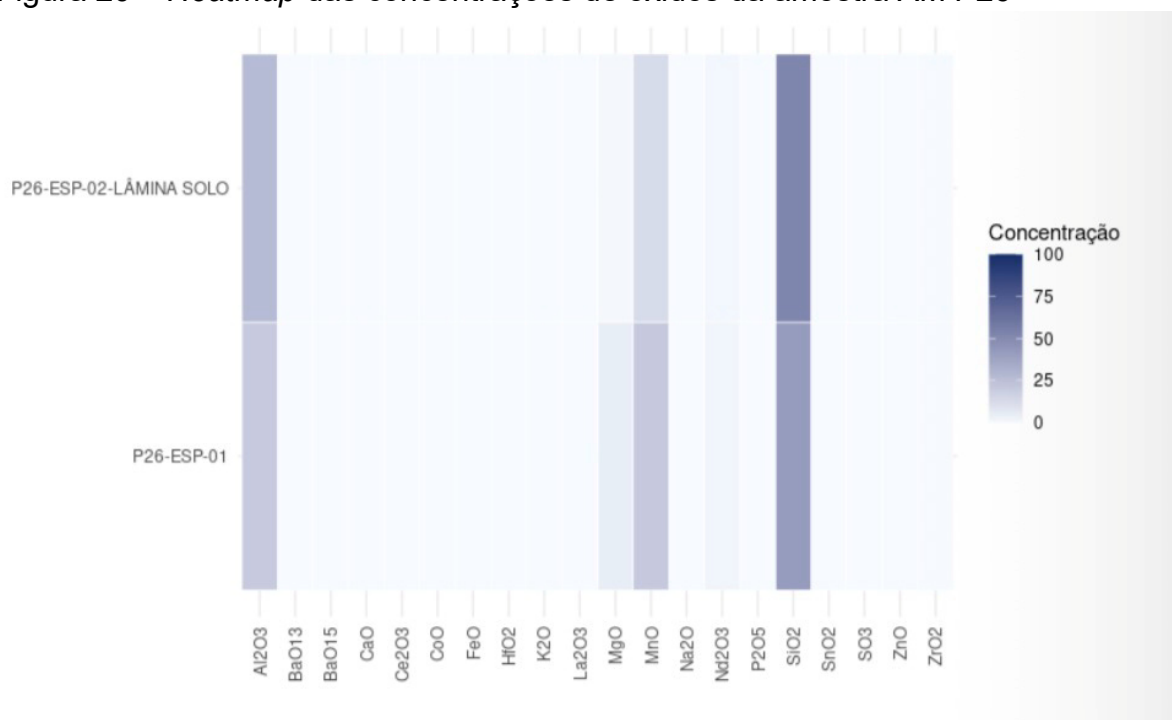
O MnO também se destaca no mapa de calor, exibindo concentrações expressivas em ambos os pontos, embora com diferenças perceptíveis de intensidade, o que sugere variação local relevante mesmo em um conjunto amostral reduzido.

Esse comportamento contrasta com MgO e SO, que aparecem com intensidades intermediárias e maior assimetria visual entre os registros, indicando maior sensibilidade a variações pontuais.

Os demais óxidos apresentam concentrações muito baixas ou próximas do limite de detecção, refletidas por colorações claras e homogêneas ao longo do mapa. Esse padrão indica ausência de contribuição significativa desses componentes na composição da amostra, ao menos nos pontos analisados.

Por fim, ressalta-se que, devido ao número limitado de observações, o mapa de calor deve ser interpretado de forma qualitativa, privilegiando a comparação relativa entre os registros, e não como representação estatística robusta da variabilidade interna da amostra. Nesse contexto, o gráfico cumpre o papel de evidenciar contrastes composicionais locais e reforçar a dominância de poucos óxidos principais na AM P26.

Figura 20 – *Heatmap* das concentrações de óxidos da amostra AM P26



Fonte: Autor (2026).

5.5.3 Amostra AM P28

As estatísticas descritivas da amostra AM P28, na Tabela 3, indicam um conjunto de dados marcado por elevada heterogeneidade composicional. Embora alguns óxidos apresentem valores médios relativamente elevados, a maioria das variáveis exibe coeficientes de variação altos, evidenciando forte dispersão entre os registros analisados.

Os maiores valores médios são observados para SiO_2 (26,28%), FeO (24,04%), Al_2O_3 (11,06%) e SO_3 (11,41%). Esses óxidos concentram a maior parcela da composição média da amostra e definem o padrão global dos dados. No entanto, mesmo entre esses componentes principais, a variabilidade é significativa, com coeficientes de variação superiores a 60%, indicando que suas concentrações variam de forma expressiva entre os diferentes pontos de análise.

O FeO destaca-se por combinar uma média elevada com um coeficiente de variação superior a 100%, refletindo a presença de valores muito distintos entre os registros. Esse comportamento sugere que a contribuição do ferro não é uniforme na amostra, sendo controlada por ocorrências localizadas. Situação semelhante é observada para o SiO_2 , cujo coeficiente de variação acima de 80% indica ampla variação em torno da tendência central.

Óxidos como MgO , Na_2O , K_2O e TiO_2 apresentam médias baixas a intermediárias associadas a coeficientes de variação elevados, o que indica distribuições assimétricas e baixa representatividade da média como medida descritiva central. Já P_2O_5 , MnO , CoO , ZrO_2 e CaO exibem coeficientes de variação extremamente altos (próximos de 224%), caracterizando distribuições dominadas por poucos valores elevados e grande número de observações muito baixas ou nulas.

De modo geral, a amostra AM P28 não apresenta óxidos com comportamento estatisticamente estável. A elevada dispersão observada para a maioria das variáveis indica que a variabilidade intra-amstral é o aspecto dominante do conjunto de dados. Assim, a interpretação dessa amostra deve privilegiar a análise da dispersão e dos contrastes entre registros, sendo a média uma medida descritiva que deve ser utilizada com cautela.

Tabela 3 – Média, desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos –

Amostra AM P28

Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
MgO	0,4112	0,5755	139,95
Na₂O	0,4308	0,6686	155,19
Al₂O₃	11,0620	7,0772	63,98
SiO₂	26,2812	21,6363	82,33
P₂O₅	0,4110	0,9190	223,61
SO₃	11,4126	15,6302	136,96
K₂O	2,0794	1,8468	88,81
MnO	0,1876	0,4195	223,61
FeO	24,0356	28,7063	119,43
ZnO	0,0000	0,0000	-
SnO₂	0,0000	0,0000	-
BaO	0,0000	0,0000	-
CoO	0,0020	0,0045	223,61
ZrO₂	0,8518	1,9047	223,61
HfO₂	0,0000	0,0000	-
CaO	0,2896	0,6476	223,61
La₂O₃	0,0000	0,0000	-
Ce₂O₃	0,0000	0,0000	-
Nd₂O₃	0,0000	0,0000	-
TiO₂	0,7148	1,0514	147,09

Fonte: Autor (2026).

Os *boxplots* da amostra AM P28, na Figura 21, evidenciam de forma clara a elevada variabilidade composicional observada nas estatísticas descritivas. Para a maioria dos óxidos, as distribuições são marcadas por grande dispersão, assimetria (exceto Al₂O₃ e FeO) e presença de valores extremos, indicando forte heterogeneidade entre os pontos analisados.

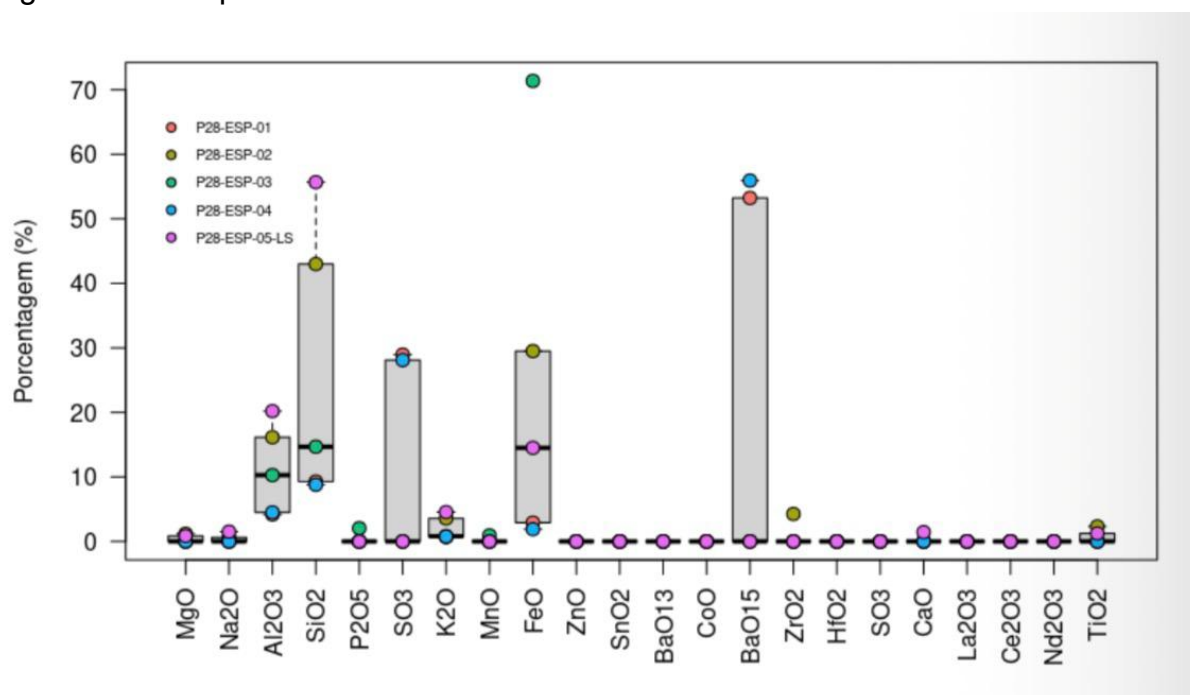
Os óxidos SiO₂, FeO e Al₂O₃, apresentam as caixas mais amplas, refletindo intervalos interquartílicos elevados e ampla variação nas concentrações. No caso do SiO₂, observa-se uma distribuição assimétrica à direita, com valores máximos elevados que ampliam significativamente a dispersão. Comportamento semelhante é observado para o FeO, cujo *boxplots* indica forte influência de valores extremos, compatível com o alto coeficiente de variação calculado para esse óxido.

O Al₂O₃ apresenta uma dispersão intermediária, com valores concentrados em torno da mediana, porém ainda com variação suficiente para indicar diferenças relevantes entre os registros. Já o SO₃ exibe um *boxplots* bastante alongado, evidenciando uma distribuição irregular e dominada por poucos valores elevados.

Óxidos como MgO, Na₂O, K₂O, MnO, CaO e TiO₂ apresentam caixas estreitas posicionadas próximas de zero, indicando concentrações geralmente baixas. No entanto, a presença de pontos isolados acima do intervalo interquartilico sugere ocorrências localizadas de enriquecimento, o que explica os elevados coeficientes de variação observados na análise estatística.

Para diversos óxidos, como ZnO, SnO₂, BaO, CoO, HfO₂, La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃, os *boxplots* são praticamente colapsados em torno de zero, refletindo a ausência ou concentrações muito reduzidas na maioria dos registros. De modo geral, os *boxplots* confirmam que a amostra AM P28 é caracterizada por distribuições altamente assimétricas e dominadas por variabilidade intra-amostral.

Figura 21 – Boxplot dos óxidos – amostra P28



Fonte: Autor (2026).

O mapa de calor da amostra AM P28, da Figura 22, permite visualizar de forma integrada a distribuição espacial das concentrações dos óxidos ao longo dos diferentes pontos analisados, evidenciando padrões de enriquecimento seletivo e forte heterogeneidade composicional.

Observa-se que o SiO₂ apresenta as maiores intensidades cromáticas em praticamente todos os pontos, especialmente nas amostras P28-ESP-02, P28-ESP-

03 e P28-ESP-05-LS. Esse comportamento é consistente com os elevados valores médios e a ampla dispersão observada nas análises estatísticas e nos *boxplots*.

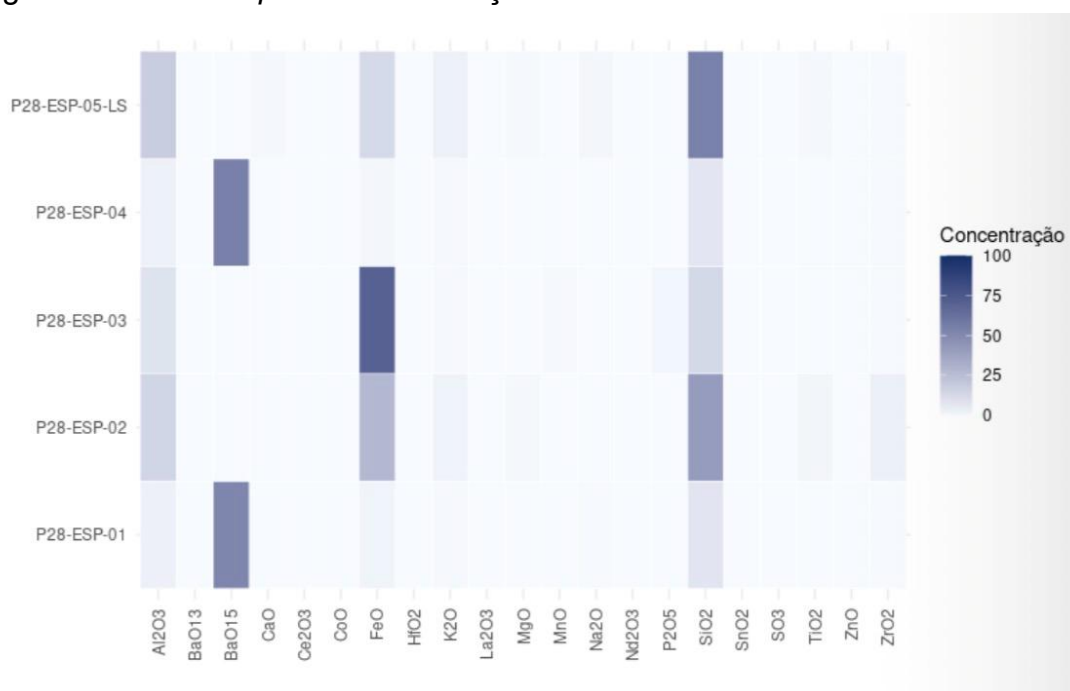
O FeO também se destaca no mapa de calor, apresentando intensidades elevadas e variáveis entre os pontos, com máximos bem definidos em P28-ESP-03 e P28-ESP-02.

O Al₂O₃ exibe coloração intermediária e relativamente homogênea quando comparado ao FeO e ao SiO₂, indicando presença significativa, porém com menor contraste espacial. Esse comportamento sugere uma contribuição mais distribuída de fases aluminosas na amostra.

O óxido BaO aparece com intensidades moderadas e pontuais, concentrando-se em poucos registros específicos. Esse padrão reforça a interpretação de que esse componente ocorre de forma localizada, sendo responsáveis pelos altos coeficientes de variação observados, apesar das baixas concentrações médias.

Para os óxidos, como ZnO, SnO₂, CoO, HfO₂, La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃, o mapa de calor apresenta coloração próxima ao mínimo em praticamente todos os pontos, indicando concentrações muito baixas ou ausentes. A ausência de contrastes relevantes para esses óxidos confirma que eles não desempenham papel dominante na assinatura geoquímica da amostra AM P28.

Figura 22 – *Heatmap* das concentrações de óxidos da amostra AM P28



Fonte: Autor (2026).

5.5.4 Amostra AM P34

As estatísticas de resumo da amostra AM P34, Tabela 4, indicam um conjunto de dados marcado por elevada variabilidade composicional, sem a presença de uma matriz química claramente estável. Embora alguns óxidos apresentem valores médios relativamente elevados, a maioria das variáveis exibe coeficientes de variação altos ou extremamente altos, evidenciando forte dispersão entre os registros analisados.

Os maiores valores médios são observados para SiO_2 (23,26%), FeO (18,25%), TiO_2 (19,08%) e Al_2O_3 (11,42%), os quais concentram a maior parcela da composição média da amostra. No entanto, mesmo esses óxidos apresentam coeficientes de variação elevados, variando aproximadamente entre 62% e 151%, o que indica que suas concentrações variam de forma expressiva entre os diferentes pontos analisados. Esse comportamento sugere que, apesar de contribuírem de forma relevante para a composição média, esses componentes não se distribuem de maneira homogênea ao longo da amostra.

O FeO e o TiO_2 , destacam-se por combinar médias relativamente altas com coeficientes de variação superiores a 100%, refletindo a presença de valores muito distintos entre os registros. Esse padrão é característico de distribuições assimétricas, nas quais poucos valores elevados exercem forte influência sobre a média, reduzindo sua representatividade como medida descritiva central.

Óxidos como BaO (6,89%) e ZrO_2 (9,28%) apresentam médias intermediárias, porém associados a coeficientes de variação extremamente elevados (aproximadamente 245%). Esse comportamento indica que esses componentes ocorrem de forma altamente esparsa, com concentrações elevadas restritas a poucos registros, enquanto a maioria das observações apresenta valores baixos ou nulos.

Os óxidos CO_2 , P_2O_5 , MnO e SO_3 exibem médias baixas, mas também coeficientes de variação extremamente altos, evidenciando distribuições dominadas por forte heterogeneidade interna e enriquecimentos pontuais. Nesses casos, o desvio-padrão supera amplamente a média, reforçando a limitação do uso is0-lado da média aritmética para a descrição desses componentes.

Por outro lado, diversos óxidos, como Na_2O , ZnO , SnO_2 , CoO , HfO_2 , La_2O_3 , Ce_2O_3 e Nd_2O_3 , apresentam valores nulos em todos os registros analisados, indicando ausência estatística ou concentrações abaixo do limite de detecção para a amostra AM P34. De forma geral, a análise estatística da amostra AM P34 revela um padrão

composicional fortemente heterogêneo, caracterizado pela ausência de óxidos com comportamento estatisticamente estável.

Tabela 4 – Média, desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos – Amostra AM P34

Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
CO₂	2,037	4,989	244,949
MgO	2,767	2,503	90,477
Na₂O	0,000	0,000	–
Al₂O₃	11,422	7,069	61,889
SiO₂	23,262	15,980	68,696
P₂O₅	0,253	0,619	244,949
K₂O	1,406	1,482	105,371
MnO	0,335	0,821	244,949
FeO^t	18,252	19,283	105,652
ZnO	0,000	0,000	–
SnO₂	0,000	0,000	–
BaO	6,887	16,868	244,949
CoO	0,000	0,000	–
ZrO₂	9,283	22,738	244,949
HfO₂	0,000	0,000	–
SO₃	3,751	9,188	119,293
CaO	1,271	1,517	119,293
La₂O₃	0,000	0,000	–
Ce₂O₃	0,000	0,000	–
Nd₂O₃	0,000	0,000	–
TiO₂	19,076	28,774	150,844

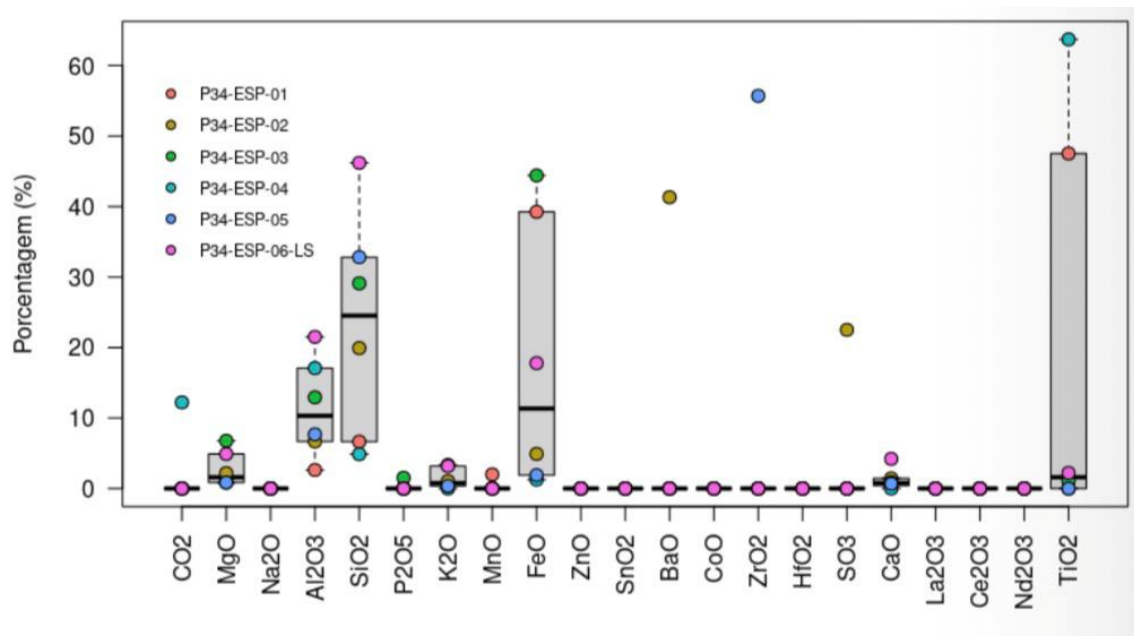
Fonte: Autor (2026).

Os *boxplots* da Figura 23 da amostra AM P34 evidenciam de forma clara a elevada variabilidade composicional previamente identificada nas estatísticas descritivas. Para a maioria dos óxidos, observa-se ampla dispersão dos dados, assimetria pronunciada e presença de alguns valores extremos, indicando forte heterogeneidade entre os diferentes pontos de análise.

Os óxidos SiO₂, FeO e TiO₂ apresentam as caixas mais amplas, refletindo intervalos interquartílicos elevados e grande variação nas concentrações. No caso do SiO, observa-se uma distribuição assimétrica, com valores elevados afastados da mediana, o que sugere que concentrações mais altas estão restritas a subconjuntos específicos da amostra. Comportamento semelhante é observado para o FeO, cujo

boxplot indica forte influência de valores extremos, em concordância com o elevado coeficiente de variação obtido na análise estatística.

Figura 23 – *Boxplot* dos óxidos – amostra P34



Fonte: Autor (2026).

O TiO_2 , destaca-se por apresentar uma das maiores amplitudes totais entre os óxidos analisados, com valores máximos elevados e mediana próxima de níveis mais baixos. Esse padrão reforça a interpretação de uma distribuição altamente assimétrica, dominada por poucos registros com concentrações significativamente superiores à maioria das observações.

O Al_2O_3 , exibe dispersão intermediária, com valores relativamente concentrados em torno da mediana, porém ainda com variação suficiente para indicar diferenças composicionais relevantes entre os pontos analisados. Esse comportamento sugere uma contribuição mais distribuída desse óxido em comparação aos componentes mais heterogêneos, embora sem caracterizar uma distribuição

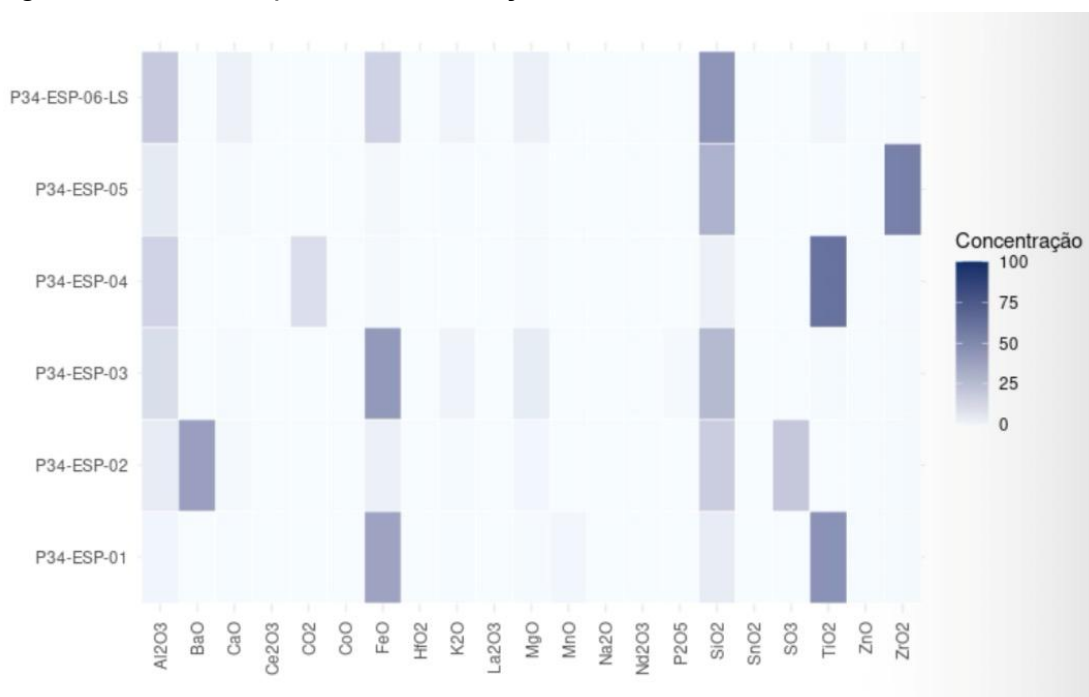
Óxidos como MgO , K_2O , CaO , MnO e SO_3 apresentam caixas estreitas posicionadas próximas a valores baixos, acompanhadas por pontos isolados em níveis mais elevados. Esse padrão indica distribuições esparsas, nas quais poucos registros concentram valores relativamente altos, explicando os coeficientes de variação elevados observados para esses componentes.

Para diversos óxidos, como Na_2O , ZnO , SnO_2 , CoO , HfO_2 , La_2O_3 , Ce_2O_3 e Nd_2O_3 , os *boxplots* encontram-se praticamente colapsados em torno de zero, refletindo a ausência ou a ocorrência de concentrações muito reduzidas na maioria dos registros analisados.

De forma geral, os *boxplots* confirmam que a amostra AM P34 é caracterizada por distribuições altamente assimétricas e dominadas por variabilidade intra-amstral. A presença recorrente de valores extremos e a ampla dispersão observada para a maioria dos óxidos reforçam a limitação do uso da média aritmética como medida descritiva isolada e justificam a utilização conjunta de medidas de dispersão e ferramentas gráficas exploratórias para a interpretação do comportamento composicional da amostra.

Observa-se na Figura 24 que o SiO_2 apresenta intensidades cromáticas moderadas a elevadas em praticamente todos os registros, com variações perceptíveis entre os pontos P34-ESP-01 a P34-ESP-06-LS. Esse comportamento indica que, embora o SiO_2 constitua um dos principais componentes da amostra, sua distribuição não é homogênea, corroborando os elevados coeficientes de variação observados para esse óxido.

Figura 24 – *Heatmap* das concentrações de óxidos de amostra AM P34



Fonte: Autor (2026).

O FeO destaca-se por exibir contrastes marcantes de intensidade entre os registros, com concentrações mais elevadas associadas a pontos específicos, enquanto outros permanecem em níveis significativamente mais baixos. Esse padrão visual confirma que a contribuição do ferro é controlada por enriquecimentos localizados, sendo um dos principais responsáveis pela elevada variabilidade composicional da amostra.

O TiO₂ também apresenta comportamento fortemente heterogêneo, com intensidades elevadas restritas a poucos registros e valores muito baixos ou ausentes nos demais. Essa distribuição pontual explica a ampla dispersão observada nos *boxplots* e o elevado coeficiente de variação associado a esse óxido.

O Al₂O₃ exibe coloração relativamente contínua, porém com variações de intensidade entre os pontos analisados. Esse padrão sugere uma contribuição mais distribuída das fases aluminosas em comparação aos óxidos mais heterogêneos, ainda que sem caracterizar uma matriz composicional estatisticamente estável.

Óxidos como BaO e ZrO₂ apresentam intensificações cromáticas pontuais, concentradas em registros específicos, enquanto permanecem praticamente ausentes nos demais pontos. Esse comportamento visual é consistente com distribuições altamente esparsas, dominadas por poucos valores elevados, conforme indicado pelos coeficientes de variação extremamente altos.

Para a maioria dos óxidos minoritários, incluindo Na₂O, ZnO, SnO₂, CoO, HfO₂, La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃, o mapa de calor apresenta coloração próxima ao mínimo em praticamente todos os registros, indicando concentrações muito baixas ou abaixo do limite de detecção ao longo da amostra.

5.5.5 Amostra AM P36

A amostra AM P36 apresenta um comportamento geoquímico marcadamente heterogêneo, como é demonstrado na Tabela 5, caracterizado por elevadas dispersões para a maioria dos óxidos analisados, conforme indicado pelos altos valores de desvio-padrão e coeficiente de variação.

Os óxidos Al₂O₃ e SiO₂, exibem médias moderadas (18,17% e 9,17%, respectivamente), porém com coeficientes de variação elevados, especialmente para o SiO₂ (175,58%). Esse padrão sugere uma distribuição extremamente irregular

desses constituintes entre os pontos analisados, indicando ausência de homogeneidade mineralógica na amostra.

Os óxidos MnO, ZnO e SnO₂ destacam-se tanto pelos valores médios relativamente elevados quanto pela variabilidade extrema. O MnO apresenta média de 18,94% e CV superior a 100%, enquanto ZnO e SnO₂ apresentam coeficientes de variação acima de 180%, alcançando valores superiores a 200%. Esses resultados indicam forte enriquecimento localizado desses elementos, possivelmente associado a fases minerais específicas ou concentrações pontuais decorrentes de processos geoquímicos secundários.

O FeO apresenta média de 5,28%, com CV de aproximadamente 169%, reforçando a interpretação de que o ferro ocorre de maneira descontínua na amostra, sem uma distribuição homogênea na matriz. Comportamento semelhante é observado para MgO, Na₂O e K₂O, todos com coeficientes de variação superiores a 120%, indicando que esses óxidos não constituem fases dominantes contínuas, mas sim componentes localizados.

O óxido de bário (BaO) e o CaO apresentam os maiores coeficientes de variação (316,23%), apesar de médias baixas, evidenciando que esses óxidos estão presentes apenas em poucos pontos específicos, o que gera grande instabilidade estatística. Situação semelhante ocorre para TiO₂ e SO₂, cujos elevados CVs refletem concentrações pontuais e descontínuas.

A presença de CO₂, com média de 1,57% e CV de 135,45%, sugere possível contribuição de fases localizadas ou interação com processos de alteração superficial, embora sua distribuição também seja altamente irregular.

Por outro lado, os óxidos CoO, ZrO₂, HfO₂, La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃ não foram detectados nos registros analisados, indicando ausência ou concentrações abaixo do limite de detecção do método analítico.

De forma geral, a amostra AM P36 é caracterizada por extrema heterogeneidade composicional, forte presença de enriquecimentos localizados e ausência de uma matriz geoquímica dominante claramente definida. Esses resultados indicam que a interpretação dos valores médios deve ser realizada com cautela, uma vez que a elevada variabilidade sugere que os dados são fortemente influenciados por poucos registros extremos.

Tabela 5 – Média, desvio padrão (SD) e coeficiente de variação (CV%) dos óxidos –

Amostra AM P36

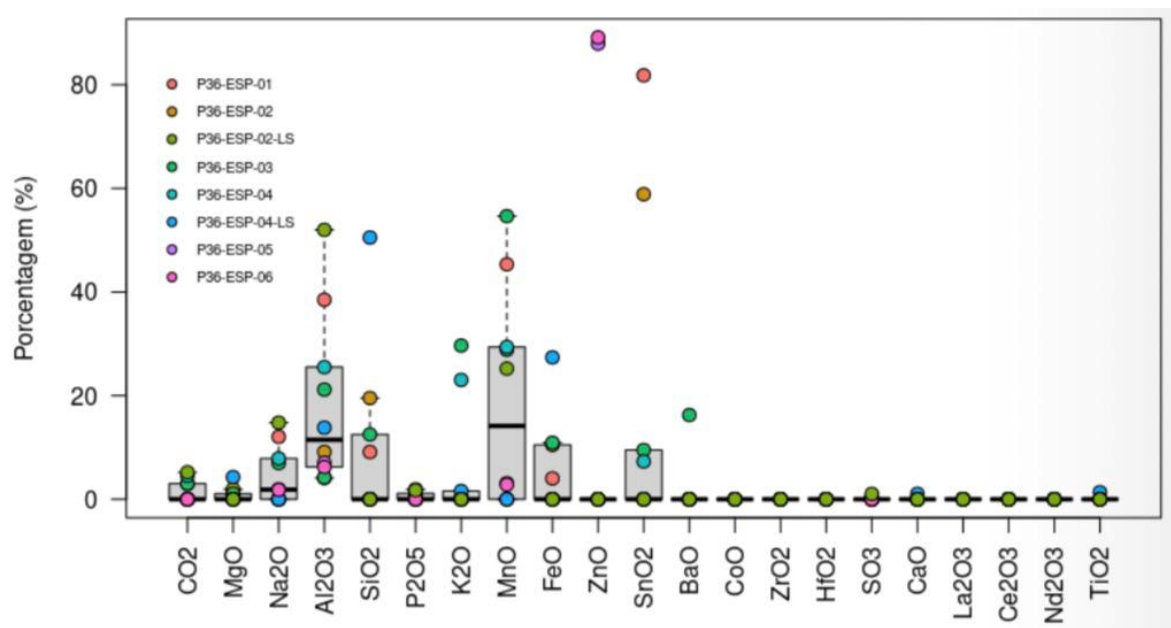
Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
CO₂	1,573	2,130	135,450
MgO	0,827	1,392	168,294
Na₂O	4,545	5,531	121,710
Al₂O₃	18,169	16,262	89,506
SiO₂	9,169	16,098	175,581
P₂O₅	0,562	0,784	139,541
K₂O	5,469	11,126	203,454
MnO	18,936	20,560	108,578
FeO	5,281	8,921	168,905
ZnO	17,707	37,330	210,825
SnO₂	15,749	29,482	187,197
BaO	1,626	5,141	316,228
CoO	0,000	0,000	–
ZrO₂	0,000	0,000	–
HfO₂	0,000	0,000	–
SO₃	0,150	0,344	230,364
CaO	0,150	0,332	316,228
La₂O₃	0,000	0,000	-
Ce₂O₃	0,000	0,000	-
Nd₂O₃	0,000	0,000	-
TiO₃	0,136	0,429	316,228

Fonte: Autor (2026).

A figura 25 mostra graficamente o comportamento estatístico dos óxidos da amostra AM P36. Os óxidos Al₂O₃, MnO, ZnO e SnO₂ exibem intervalos interquartílicos amplos, acompanhados por caudas longas e presença de valores extremos. Esse padrão evidencia que as concentrações desses constituintes não se distribuem de forma uniforme, sendo controladas por poucos registros significativamente mais elevados do que a mediana. Tal comportamento sugere a ocorrência de enriquecimentos localizados, possivelmente associados a fases minerais específicas ou a processos geoquímicos de caráter pontual.

Além disso, óxidos como BaO, CaO, TiO₂ e SO₃ apresentam caixas pouco desenvolvidas, associadas a valores extremos isolados, o que indica ocorrência restrita a poucos pontos amostrais. Esse padrão gráfico confirma que, para esses óxidos, a mediana não representa adequadamente o conjunto de dados, uma vez que a variabilidade é fortemente influenciada por registros atípicos.

Figura 25 – Boxplot dos óxidos – amostra P36



Fonte: Autor (2026).

O mapa de calor da amostra AM P36, apresentado na Figura 26, expressa que o Al_2O_3 apresenta coloração moderada a intensa em grande parte dos registros, indicando participação recorrente na composição da amostra, ainda que com variações perceptíveis de intensidade entre os pontos. Esse comportamento sugere que o alumínio constitui um componente relativamente frequente, porém distribuído de forma desigual ao longo da amostra.

Os óxidos MnO , ZnO e SnO_2 exibem padrões marcadamente heterogêneos, caracterizados por regiões isoladas de coloração mais intensa contrastando com extensas áreas de valores próximos a zero. Tal distribuição indica que esses óxidos ocorrem de maneira localizada, concentrando-se em poucos registros específicos, o que explica a elevada variabilidade observada nas análises estatísticas e gráficas anteriores.

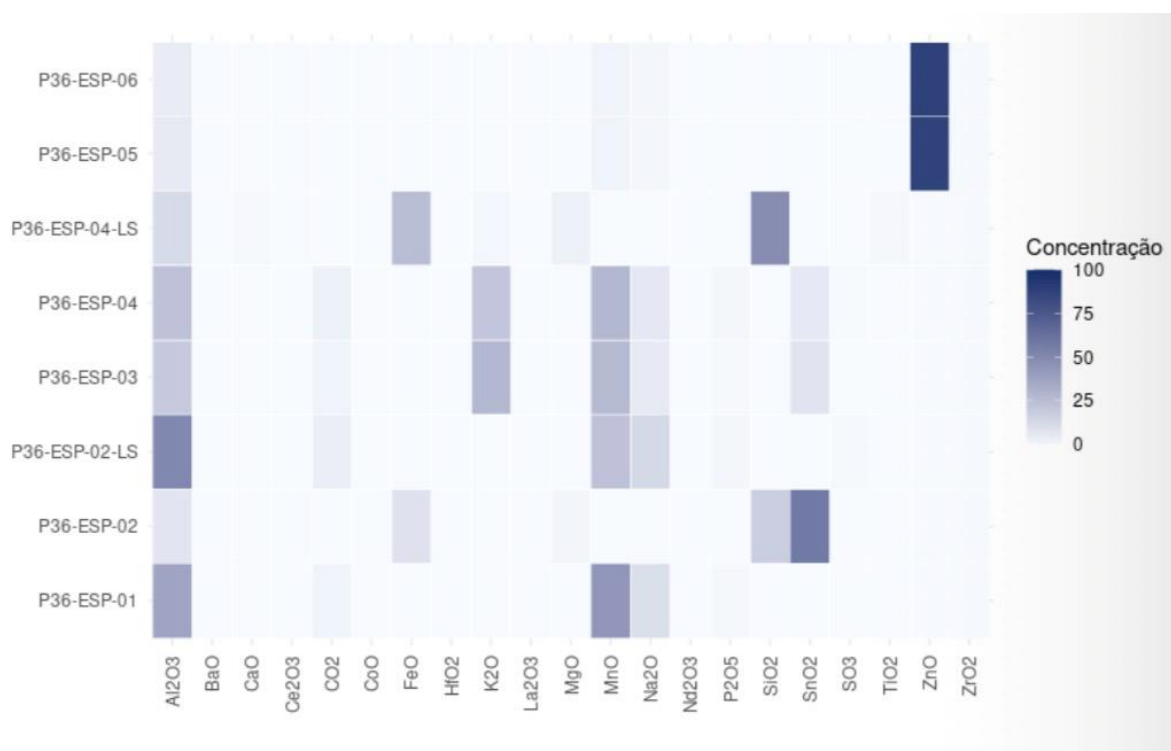
O SiO_2 apresenta intensificação pontual em alguns registros, sem continuidade ao longo da amostra, sugerindo ausência de uma fase silicatada dominante e homogênea. De forma semelhante, o FeO mostra variações abruptas de intensidade entre os registros, reforçando a interpretação de que o ferro ocorre de maneira descontínua, associado a enriquecimentos locais.

Por outro lado, diversos óxidos, como CaO , BaO , TiO_2 , ZrO_2 e os óxidos de terras raras, apresentam coloração predominantemente clara em todo o mapa,

indicando concentrações muito baixas ou valores abaixo do limite de detecção na maior parte dos registros analisados.

Em síntese, o mapa de calor da amostra AM P36 revela uma distribuição composicional fortemente irregular, marcada pela alternância entre regiões empobrecidas e enriquecimentos pontuais. Esse padrão confirma a elevada heterogeneidade intra-amostal e reforça que a assinatura geoquímica da amostra é controlada por poucos registros de alta concentração, em detrimento de uma matriz composicional contínua.

Figura 26 – Heatmap das concentrações de óxidos da amostra AM P36



Fonte: Autor (2026).

5.5.6 Amostra AM P37

Observando-se a Tabela 6 o FeO constitui o principal componente da amostra, apresentando média de 49,96%, seguido pelo SiO₂ (28,05%) e pelo Al₂O₃ (10,35%). Esses três óxidos concentram a maior parte da composição média da amostra, sugerindo que a assinatura geoquímica global é fortemente controlada por fases ricas em ferro e sílica, com contribuição secundária de componentes aluminosos.

No entanto, todos esses óxidos apresentam coeficientes de variação relativamente elevados, variando entre aproximadamente 62% e 70%, indicando que suas concentrações variam de forma expressiva entre os diferentes registros analisados.

O FeO destaca-se por combinar a maior média com um desvio-padrão elevado, refletindo ampla dispersão dos dados. Esse comportamento sugere que, apesar de ser o óxido dominante, sua distribuição não é homogênea ao longo da amostra, sendo influenciada por variações locais de enriquecimento.

O SiO₂ e o Al₂O₃ exibem comportamento semelhante, com médias significativas e coeficientes de variação moderados a elevados, indicando que esses componentes participam de forma recorrente da composição da amostra, porém com flutuações relevantes entre os pontos analisados.

Óxidos como Na₂O e K₂O apresentam médias baixas a intermediárias, associadas a coeficientes de variação elevados, sobretudo no caso do K₂O (99,26%). Esse padrão indica distribuições assimétricas, nas quais poucos valores mais elevados influenciam a média, limitando sua representatividade estatística.

Tabela 6 – Média, desvio-padrão (SD) coeficiente de variação (CV%) dos óxidos –
Amostra AM P37

Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
MgO	0,290	0,593	204,583
Na₂O	1,147	0,684	59,604
Al₂O₃	10,352	6,416	61,979
SiO₂	28,046	19,023	67,829
P₂O₅	0,000	0,000	–
K₂O	1,535	1,524	99,263
MnO	0,000	0,000	–
FeO^t	49,960	35,123	70,302
ZnO	0,000	0,000	–
SnO₂	0,000	0,000	–
BaO	0,000	0,000	–
CoO	0,000	0,000	–
ZrO₂	8,299	19,292	232,454
HfO₂	0,000	0,000	–
SO₃	0,000	0,000	–
CaO	0,116	0,307	264,575
La₂O₃	0,000	0,000	–
Ce₂O₃	0,000	0,000	–
Nd₂O₃	0,000	0,000	–
TiO₂	0,254	0,450	177,319

Fonte: Autor (2026).

O ZrO_2 exibe média intermediária (8,30%) acompanhada de coeficiente de variação extremamente alto (232,45%), caracterizando uma distribuição fortemente heterogênea, dominada por enriquecimentos pontuais em poucos registros. Comportamento semelhante é observado para MgO , CaO e TiO_2 , cujos coeficientes de variação elevados indicam ocorrência esparsa e alta sensibilidade a variações locais.

Por outro lado, diversos óxidos, como P_2O_5 , MnO , ZnO , SnO_2 , BaO , CoO , HfO_2 , SO_3 , La_2O_3 , Ce_2O_3 e Nd_2O_3 , apresentam valores nulos em todos os registros analisados, indicando ausência estatística ou concentrações abaixo do limite de detecção para a amostra AM P37.

De forma geral, a amostra AM P37 é caracterizada por uma composição dominada por FeO e SiO_2 , porém marcada por elevada variabilidade intra-amostal. A dispersão observada para a maioria dos óxidos reforça a necessidade de cautela na interpretação da média aritmética como medida descritiva isolada.

Na figura 27, os *boxplots* da amostra AM P37 evidenciam de forma clara a dominância do FeO e do SiO_2 na composição da amostra, bem como a elevada variabilidade associada a esses óxidos. Observa-se que o FeO apresenta a caixa mais ampla entre todas as variáveis analisadas, refletindo um intervalo interquartil elevado e grande dispersão dos dados. A presença de um valor extremo em níveis mais baixos e mais elevados indica uma distribuição fortemente heterogênea, em concordância com o elevado coeficiente de variação obtido na análise estatística.

O SiO_2 também exibe dispersão significativa, com caixa ampla e mediana deslocada em relação aos valores máximos, sugerindo uma distribuição assimétrica. Esse comportamento indica que concentrações mais elevadas de sílica estão associadas a subconjuntos específicos da amostra, enquanto outros registros apresentam valores consideravelmente mais baixos.

O La_2O_3 apresenta dispersão intermediária, com valores concentrados em torno da mediana e menor influência de valores extremos quando comparado ao FeO e ao SiO_2 . Esse padrão sugere uma participação mais distribuída das fases aluminosas, ainda que com variação relevante entre os diferentes pontos analisados.

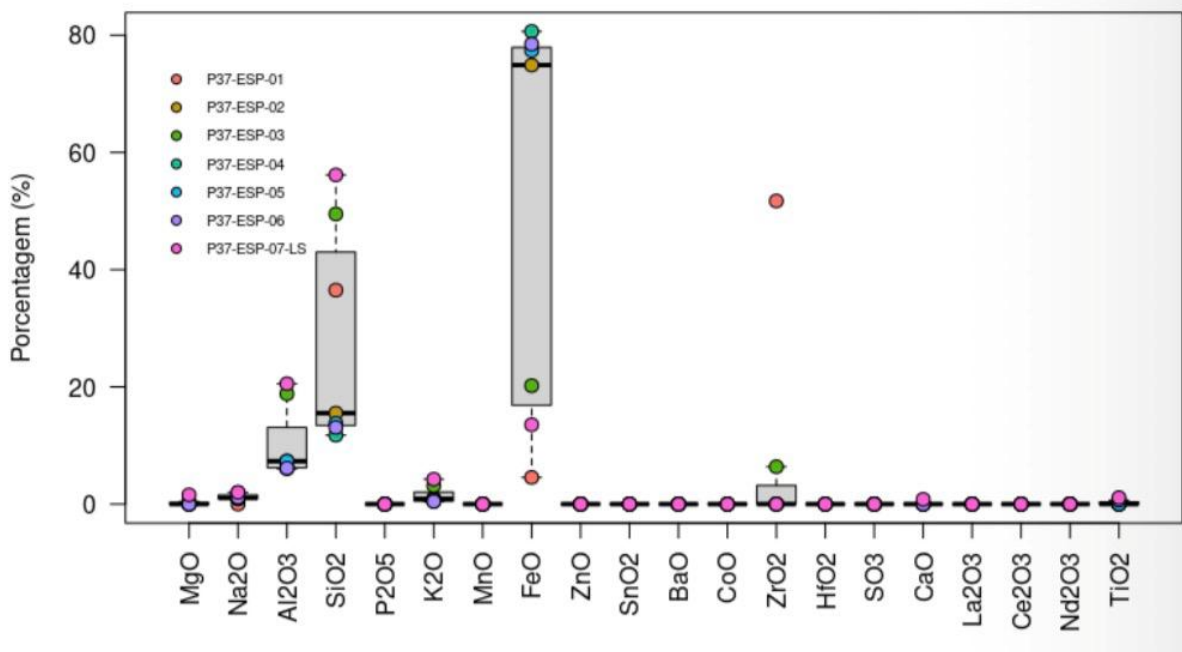
Óxidos como Na_2O e K_2O apresentam caixas estreitas posicionadas em níveis baixos, acompanhadas por alguns pontos isolados com valores relativamente mais

elevados. Esse padrão é indicativo de distribuições assimétricas, nas quais poucos registros exercem forte influência sobre a média, o que explica os coeficientes de variação elevados observados para esses componentes.

O ZrO_2 apresenta uma distribuição altamente esparsa, com a maior parte dos valores concentrada próxima de zero e a ocorrência de poucos registros com concentrações elevadas. Esse comportamento resulta em uma caixa reduzida e pontos isolados afastados da mediana, refletindo o coeficiente de variação extremamente alto associado a esse óxido.

Para a maioria dos óxidos minoritários, incluindo MgO , CaO , TiO_2 , bem como aqueles que apresentam valores nulos nas estatísticas descritivas (P_2O_5 , MnO , ZnO , SnO_2 , BaO , CoO , HfO_2 , SO_3 , La_2O_3 , Ce_2O_3 e Nd_2O_3), os *boxplots* encontram-se colapsados ou próximos de zero. Esse padrão reflete a ausência ou a ocorrência muito limitada desses componentes na maioria dos registros analisados.

Figura 27 – Boxplot dos óxidos – amostra P37



Fonte: Autor (2026).

No mapa de calor da amostra AM P37, figura 28, os maiores níveis de concentração de FeO concentram-se nos registros P37-ESP-02, P37-ESP-04, P37-ESP-05 e P37-ESP-06, enquanto valores mais baixos são observados em outros pontos, o que reforça a distribuição assimétrica previamente identificada nos *boxplots*.

Esse padrão sugere a presença de domínios composicionais distintos dentro da amostra.

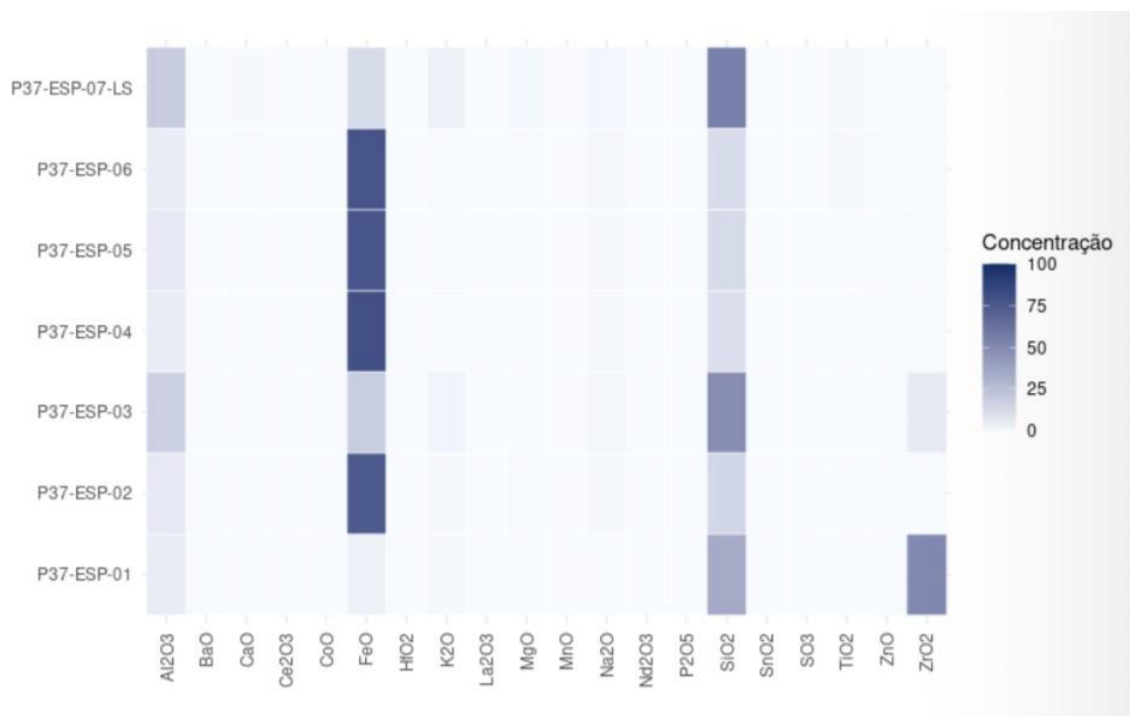
O SiO_2 também apresenta variações significativas entre os registros, com intensidades mais elevadas nos pontos P37-ESP-01, P37-ESP-03 e P37-ESP-07-LS. A alternância entre regiões com enriquecimento em sílica e regiões com valores mais baixos indica que a contribuição desse óxido não é homogênea ao longo da amostra.

O Al_2O_3 exibe coloração intermediária relativamente constante, sugerindo presença recorrente em todos os registros, porém com variações de intensidade que refletem a dispersão observada nas análises estatísticas e nos *boxplots*. Esse comportamento indica que os componentes aluminosos participam de forma sistemática da composição, ainda que com flutuações relevantes.

O ZrO_2 destaca-se por apresentar enriquecimento pontual, com concentrações elevadas observadas principalmente no registro P37-ESP-01. Esse padrão reforça o caráter esparso e altamente localizado desse óxido, coerente com o elevado coeficiente de variação identificado na análise descritiva.

Óxidos como Na_2O , K_2O , MgO e CaO apresentam intensidades baixas e distribuição irregular, com concentrações discretas em poucos registros, refletindo sua natureza minoritária e distribuição assimétrica. Já os óxidos P_2O_5 , MnO , ZnO , SnO_2 , BaO , CoO , HfO_2 , SO_3 , La_2O_3 , Ce_2O_3 e Nd_2O_3 apresentam coloração uniforme próxima ao limite inferior da escala, indicando ausência estatística ou concentrações muito reduzidas em todos os registros analisados.

Figura 28 – Heatmap das concentrações de óxidos da amostra AM P37



Fonte: Autor (2026).

5.5.7 Amostra AM P39

As estatísticas descritivas da amostra AM P39, apresentadas na Tabela 7, indicam um conjunto de dados caracterizado por elevada heterogeneidade composicional. O SiO₂ constitui o principal componente da amostra, com média de 34,83% e coeficiente de variação relativamente moderado (35,52%), indicando que, apesar da variabilidade presente, sua distribuição é mais estável quando comparada à maioria dos demais óxidos. O Al₂O₃ também apresenta contribuição significativa (15,46%), associada a um coeficiente de variação de 50,86%, sugerindo variações relevantes entre os pontos analisados, porém sem caráter extremamente esparsos.

O FeO apresenta média de 8,92% e coeficiente de variação de 43,62%, indicando dispersão moderada e sugerindo que o ferro participa de forma relativamente recorrente da composição da amostra, ainda que com flutuações consideráveis entre os registros.

Destaca-se o ZrO₂, com média de 15,94%, porém associado a um coeficiente de variação elevado (155,36%). Esse comportamento indica uma distribuição altamente assimétrica, caracterizada pela ocorrência de valores elevados em poucos registros específicos, enquanto a maioria das observações apresenta concentrações

baixas ou nulas. Padrão semelhante é observado para os óxidos de terras raras La_2O_3 , Ce_2O_3 e Nd_2O_3 , que exibem médias não desprezíveis, porém acompanhadas de coeficientes de variação superiores a 150%, evidenciando enriquecimentos pontuais e forte heterogeneidade interna.

Óxidos como Na_2O , ZnO , Y_2O_3 , HfO_2 , CaO e TiO_2 apresentam médias muito baixas associadas a coeficientes de variação extremamente elevados (244,95%), caracterizando distribuições dominadas por poucos valores distintos e grande número de observações próximas de zero. Nesses casos, o desvio-padrão supera amplamente a média, tornando esta última uma medida pouco representativa do comportamento central dos dados.

Por outro lado, diversos óxidos, como MgO , P_2O_5 , MnO , ZnO , SnO_2 , CoO , SO_3 , apresentam valores nulos em todos os registros analisados, indicando ausência estatística ou concentrações abaixo do limite de detecção do método analítico.

De modo geral, a amostra AM P39 apresenta uma matriz composicional dominada por SiO_2 e Al_2O_3 , com contribuição relevante de FeO , sobre a qual se sobrepõem enriquecimentos localizados de ZrO_2 e elementos terras raras. A elevada dispersão observada para a maioria dos óxidos reforça a necessidade de cautela na interpretação da média aritmética de forma isolada, sendo fundamental a análise conjunta das medidas de dispersão e das representações gráficas exploratórias.

Tabela 7 – Média, desvio-padrão (SD) coeficiente de variação (CV%) dos óxidos –
Amostra AM P39

Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
MgO	0,000	0,000	–
Na₂O	0,131	0,322	244,949
Al₂O₃	15,459	7,863	50,862
SiO₂	34,826	12,369	35,516
P₂O₅	0,000	0,000	–
K₂O	2,018	1,800	89,197
MnO	0,000	0,000	–
FeO^t	8,922	3,891	43,618
ZnO	0,243	0,595	244,949
SnO₂	0,000	0,000	–
Y₂O₃	1,823	4,466	244,949
CoO	0,000	0,000	–
ZrO₂	15,941	24,766	155,363
HfO₂	0,124	0,303	244,949
SO₃	0,000	0,000	–

CaO	0,155	0,380	244,949
La₂O₃	8,032	13,744	171,124
Ce₂O₃	7,956	19,487	244,949
Nd₂O₃	4,174	6,466	154,922
TiO₂	0,198	0,484	244,949

Fonte: Autor (2026).

Os *boxplots* da amostra AM P39, Figura 29, evidenciam diferenças marcantes na dispersão e na distribuição dos óxidos analisados, reforçando o caráter heterogêneo da composição química da amostra. Os óxidos SiO₂ e FeO apresentam distribuições relativamente consistentes, com intervalos interquartílicos bem definidos e medianas situadas em níveis intermediários. Embora se observe variabilidade entre os registros, esses componentes mantêm comportamento mais estável quando comparados aos demais óxidos, confirmando sua importância na matriz composicional da amostra.

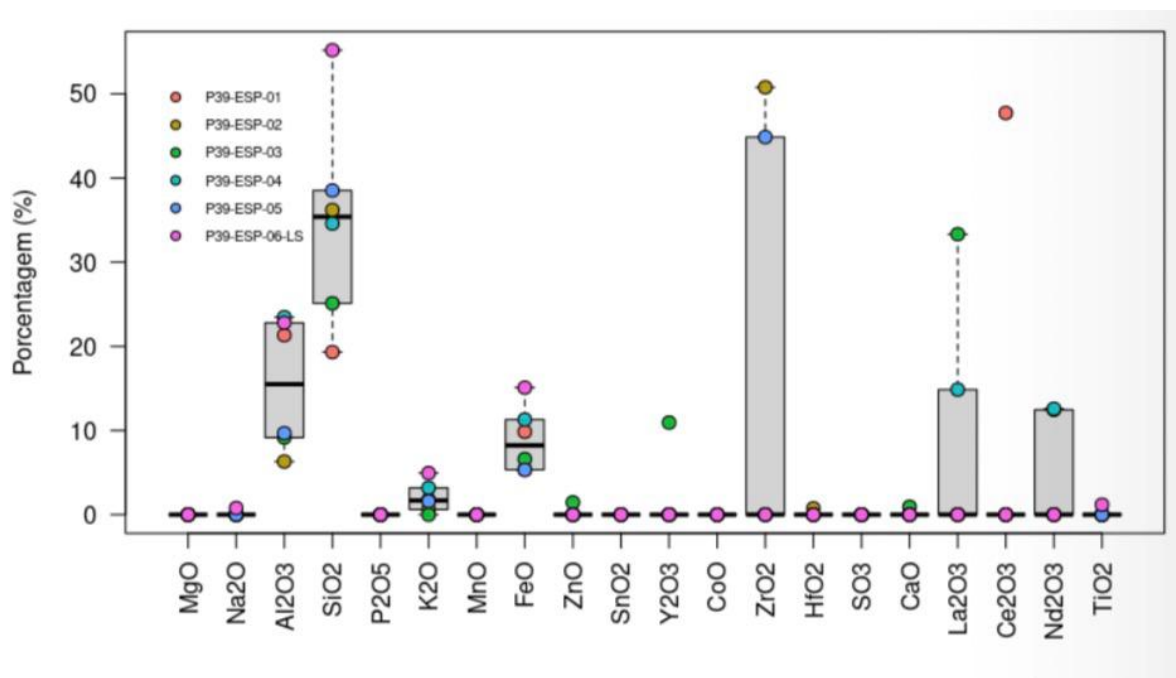
Entretanto, o ZrO₂ apresenta distribuição fortemente assimétrica, caracterizada por valores elevados concentrados em poucos registros, enquanto a maioria das observações permanece próxima de zero. Esse padrão explica a elevada variabilidade associada a esse óxido e sua contribuição pontual para a composição da amostra.

Os óxidos de terras raras La₂O₃ e Nd₂O₃ exibem comportamento semelhante, com distribuições esparsas e presença de enriquecimentos localizados, evidenciando forte heterogeneidade intra-amostral.

Óxidos como Na₂O, K₂O, ZnO, Y₂O₃, HfO₂, CaO e TiO₂ apresentam valores predominantemente baixos, intercalados por poucos registros com concentrações mais elevadas, o que resulta em distribuições altamente assimétricas e grande sensibilidade a valores extremos.

Por fim, MgO, P₂O₅, MnO, SnO₂, CoO e SO₃ permanecem concentrados em torno de valores nulos, indicando ausência estatística ou concentrações muito baixas em todos os registros analisados.

Figura 29 – Boxplot dos óxidos – amostra P39



Fonte: Autor (2026).

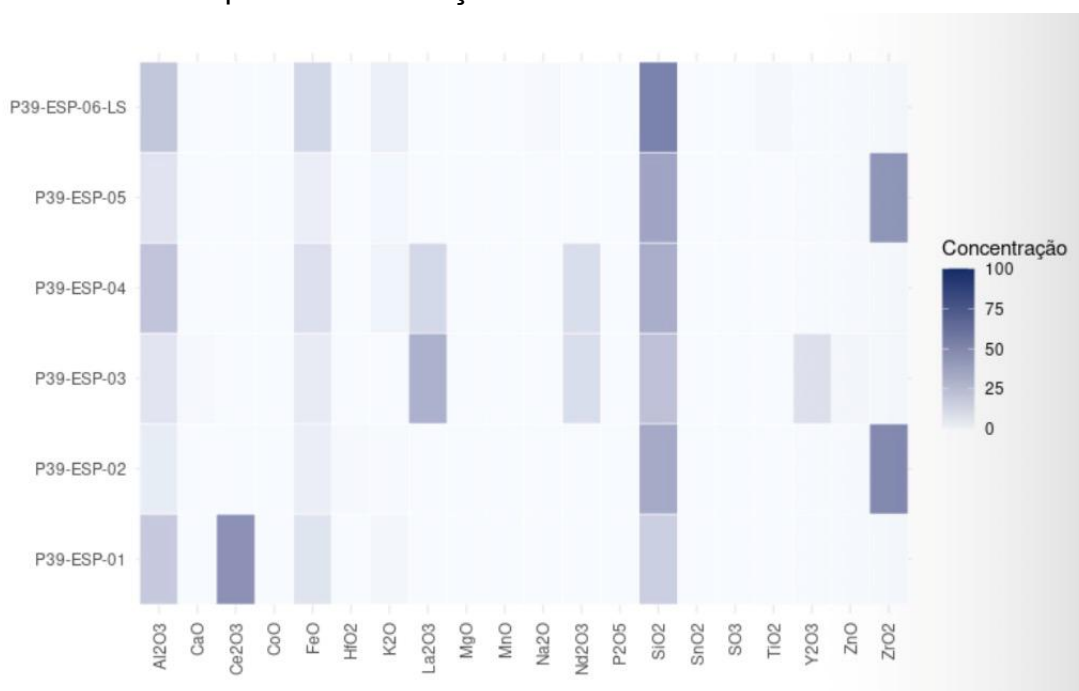
O mapa de calor da amostra AM P39, apresentada na Figura 30, mostra que o SiO_2 apresenta coloração mais intensa em praticamente todos os registros, indicando sua presença consistente ao longo da amostra, embora com variações de intensidade entre os pontos. Comportamento semelhante, porém em menor magnitude, é observado para o Al_2O_3 , reforçando o papel desses óxidos como componentes dominantes da matriz composicional.

O FeO apresenta intensidade intermediária e distribuição relativamente homogênea entre os registros, sugerindo participação recorrente, ainda que com variações moderadas de concentração.

Todavia, o ZrO_2 destaca-se por apresentar coloração intensa em poucos registros específicos, enquanto permanece praticamente ausente nos demais. Esse comportamento confirma a ocorrência pontual desse óxido e explica sua elevada variabilidade, já identificada nas análises descritivas e gráficas anteriores.

Os óxidos de terras raras, em especial La_2O_3 , Ce_2O_3 e Nd_2O_3 , exibem padrões esparsos, com concentrações elevadas concentradas em registros isolados. A alternância entre regiões de baixa e alta intensidade no mapa de calor evidencia enriquecimentos localizados, reforçando a forte heterogeneidade intra-amostral associada a esses elementos.

Figura 30 – Heatmap das concentrações de óxidos da amostra AM P39



Fonte: Autor (2026).

Óxidos como Na₂O, K₂O, ZnO, Y₂O₃, HfO₂, CaO e TiO₂ apresentam, em geral, coloração clara, intercalada por poucos pontos de maior intensidade, caracterizando distribuições dominadas por valores baixos e ocorrência esporádica de concentrações mais elevadas.

Por fim, MgO, MnO, SnO₂, CoO e SO₃ mantêm coloração praticamente uniforme e próxima dos níveis mínimos em todos os registros, indicando ausência estatística ou concentrações muito reduzidas ao longo da amostra.

5.5.8 Amostra AM P41

A amostra AM P41 apresenta um comportamento composicional distinto em relação às demais amostras analisadas, sendo caracterizada pela predominância de poucos óxidos com distribuição relativamente estável e pela ausência estatística da maior parte dos constituintes avaliados. As estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 8 indicam uma assinatura geoquímica bem definida, dominada principalmente por SiO₂, Al₂O₃, CaO e FeO.

Tabela 8 - Média, desvio-padrão (SD) coeficiente de variação (CV%) dos óxidos –

Amostra AM P39

Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
MgO	0,380	0,537	141,421
Na₂O	0,000	0,000	–
Al₂O₃	21,048	3,652	17,352
SiO₂	44,615	0,453	1,016
P₂O₅	0,000	0,000	–
SO₃	0,000	0,000	–
K₂O	0,000	0,000	–
MnO	0,000	0,000	–
FeO	13,588	2,782	20,478
ZnO	0,000	0,000	–
SnO₂	0,000	0,000	–
Y₂O₃	0,000	0,000	–
BaO	0,000	0,000	–
CoO	0,000	0,000	–
ZrO₂	0,000	0,000	–
HfO₂	0,000	0,000	–
CaO	20,370	0,120	0,590
La₂O₃	0,000	0,000	–
Ce₂O₃	0,000	0,000	–
Nd₂O₃	0,000	0,000	–
TiO₂	0,000	0,000	–

Fonte: Autor (2026).

O SiO₂ constitui o principal componente da amostra, com média de 44,62% e coeficiente de variação extremamente baixo (1,02%), indicando reduzida variabilidade entre os registros analisados. Esse comportamento sugere a presença de uma fase silicatada contínua e relativamente homogênea. De forma análoga, o CaO apresenta média de 20,37% e coeficiente de variação inferior a 1%, reforçando a interpretação de uma distribuição uniforme ao longo da amostra.

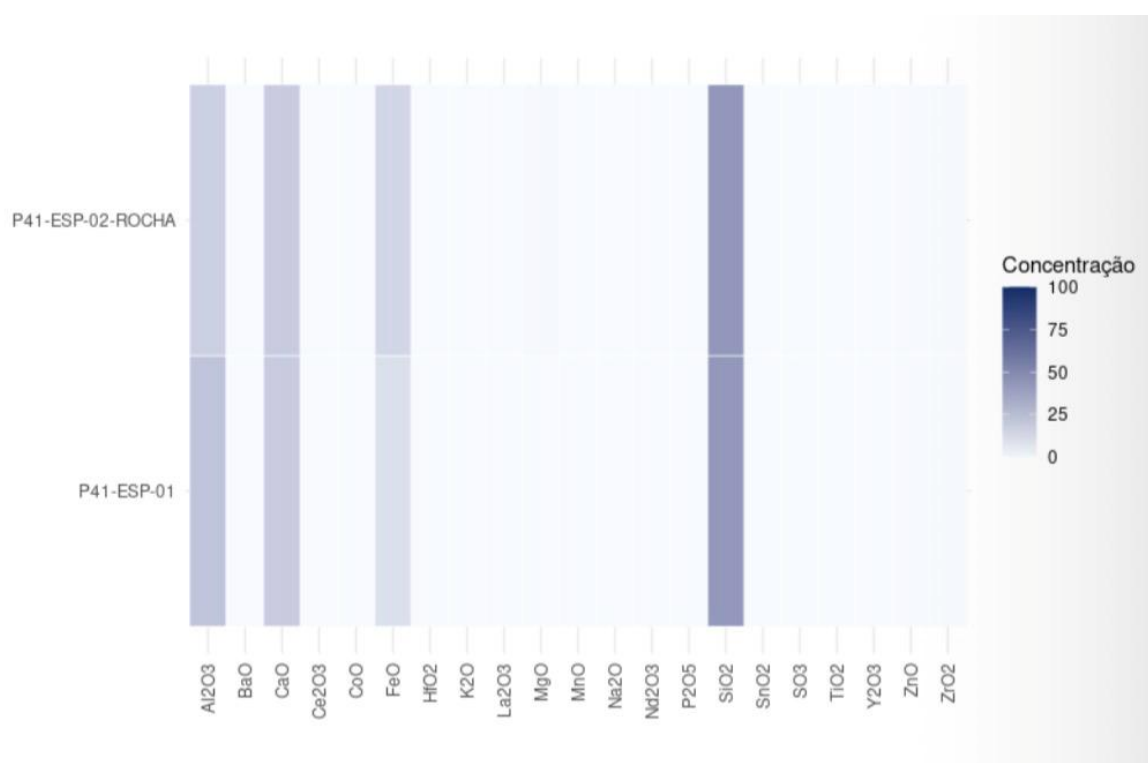
O Al₂O₃ exibe média de 21,05%, acompanhada por um coeficiente de variação de 17,35%, o que indica variabilidade moderada quando comparado aos principais constituintes. Já o FeO apresenta média de 13,59% e coeficiente de variação de 20,48%, sugerindo flutuações mais expressivas entre os registros, embora ainda restritas a um conjunto reduzido de valores.

O MgO ocorre em baixas concentrações médias (0,38%), porém com elevado coeficiente de variação (141,42%), indicando forte sensibilidade a pequenas variações absolutas nos teores observados. Os demais óxidos analisados apresentam médias

nulas e ausência de dispersão estatística, refletindo concentrações muito baixas ou valores abaixo do limite de detecção nos registros disponíveis.

A análise do mapa de calor da amostra AM P41 (Figura 31) reforça essas interpretações, evidenciando a concentração dos maiores valores em poucos óxidos específicos e a predominância de coloração clara para a maioria dos constituintes, indicando baixos teores ao longo de toda a amostra.

Figura 31 – Heatmap das concentrações de óxidos da amostra AM P41



Fonte: Autor (2026).

Cabe destacar, contudo, que as interpretações estatísticas da amostra AM P41 devem ser realizadas com cautela, uma vez que cada óxido é representado por apenas duas observações. Nesse contexto, medidas como desvio-padrão e coeficiente de variação tornam-se particularmente sensíveis a pequenas flutuações nos dados, podendo superestimar ou subestimar a variabilidade real do sistema.

Assim, os resultados apresentados devem ser compreendidos como indicativos preliminares do comportamento composicional da amostra, e não como uma caracterização estatística plenamente robusta.

O mapa de calor da amostra AM P41, apresentado na Figura 31, evidencia um padrão composicional simples e bem delimitado, no qual poucos óxidos concentram

praticamente toda a variabilidade observada entre os registros analisados. A representação gráfica reforça a predominância de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e FeO , em contraste com a ocorrência residual ou ausência estatística da maioria dos demais constituintes.

O SiO_2 destaca-se visualmente pela coloração mais intensa e homogênea nos dois registros avaliados, indicando concentrações elevadas e baixa variação relativa entre as observações. Esse comportamento gráfico está em plena concordância com os valores médios elevados e o baixo coeficiente de variação observados na análise estatística, sugerindo que o silício desempenha papel dominante na composição da amostra.

Os óxidos Al_2O_3 e CaO também apresentam coloração moderada e consistente entre os registros, indicando participação significativa e distribuição relativamente uniforme. Já o FeO , embora apresente coloração perceptível no mapa, exibe variação visual mais evidente entre os dois pontos analisados, refletindo a maior dispersão relativa indicada pelas estatísticas descritivas.

Por outro lado, a maior parte dos óxidos, incluindo Na_2O , K_2O , ZnO , MgO , MnO , Y_2O_3 , TiO_2 , SnO_2 e ZrO_2 , apresenta coloração clara e praticamente constante em todo o mapa, indicando concentrações muito baixas ou valores abaixo do limite de detecção nos registros disponíveis. Esse padrão reforça a ausência de contribuição significativa desses constituintes para a assinatura geoquímica da amostra AM P41.

Cabe ressaltar que as interpretações derivadas do mapa de calor devem ser realizadas com cautela, uma vez que a amostra AM P41 é composta por apenas duas observações por óxido. Nesse contexto, diferenças visuais sutis entre os registros podem assumir maior destaque gráfico do que aquele que seria observado em conjuntos amostrais mais robustos. Assim, o mapa de calor fornece uma visualização exploratória do comportamento composicional da amostra, devendo ser interpretado como indicativo de tendências gerais, e não como representação estatisticamente conclusiva da variabilidade interna.

5.5.9 Amostra AM P42

A Tabela 9 apresenta as estatísticas descritivas dos óxidos da amostra AM P42, revela que o FeO se destaca como o principal constituinte da amostra, com média de 29,31%, embora associado a um desvio-padrão elevado e coeficiente de variação de

78,43%, indicando diferenças expressivas entre os registros analisados. O SiO_2 , também apresenta participação relevante, com média de 27,10% e coeficiente de variação de 55,05%, sugerindo uma distribuição relativamente ampla, porém sem predomínio extremo de valores isolados.

Tabela 9 - Média, desvio-padrão (SD) coeficiente de variação (CV%) dos óxidos –
Amostra AM P42

Óxido	Média (%)	DP (%)	CV (%)
MgO	0,727	0,644	88,612
Na₂O	0,000	0,000	–
Al₂O₃	13,999	8,598	61,420
SiO₂	27,096	14,916	55,051
P₂O₅	0,098	0,240	244,949
K₂O	0,599	0,798	133,262
MnO	0,308	0,754	244,949
FeO^t	29,305	22,984	78,430
ZnO	0,000	0,000	–
SnO₂	10,316	25,269	244,949
Y₂O₃	0,000	0,000	–
BaO	0,000	0,000	–
CoO	0,000	0,000	–
ZrO₂	8,034	19,678	244,949
HfO₂	0,000	0,000	–
SO₃	0,000	0,000	–
CaO	0,096	0,236	244,949
La₂O₃	0,000	0,000	–
Ce₂O₃	0,000	0,000	–
Nd₂O₃	0,000	0,000	–
TiO₂	9,423	17,433	185,006

Fonte: Autor (2026).

O Al_2O_3 exibe média de 14,00%, acompanhada de coeficiente de variação de 61,42%, o que evidencia variações consideráveis entre os pontos amostrais. Em conjunto, FeO, SiO_2 e Al_2O_3 , definem a base composicional da amostra, ainda que apresentem comportamento heterogêneo.

Entre os óxidos com médias intermediárias, destacam-se o SnO_2 (10,32%), o TiO_2 (9,42%) e o ZrO_2 (8,03%). No entanto, todos apresentam coeficientes de variação elevados, superiores a 180%, indicando que esses componentes ocorrem de forma irregular, concentrando-se em poucos registros específicos.

O MgO apresenta média baixa (0,73%), mas com coeficiente de variação elevado (88,61%), sugerindo que sua presença não é homogênea entre os pontos analisados. Situação semelhante é observada para o K₂O e o MnO, cujas médias reduzidas são acompanhadas por elevada dispersão, caracterizando distribuições fortemente assimétricas.

Óxidos como P₂O₅, e CaO exibem médias próximas de zero e coeficientes de variação extremamente elevados, indicando ocorrência esporádica e pouca representatividade da média como medida descritiva central. Por outro lado, Na₂O, SO₃, ZnO, Y₂O₃, HfO₂, CaO e os óxidos de terras raras La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃ apresentam valores nulos em todos os registros analisados, sugerindo ausência estatística ou concentrações abaixo do limite de detecção.

De maneira geral, a amostra AM P42 apresenta uma composição dominada por FeO e SiO₂, com contribuições relevantes de Al₂O₃, enquanto os demais óxidos ocorrem de forma pontual, resultando em elevada variabilidade composicional e forte heterogeneidade entre os registros.

Os *boxplots* da amostra AM P42, demonstrado na Figura 32, revelam uma composição dominada por poucos óxidos principais, acompanhada por elevada variabilidade entre os pontos analisados. O FeO apresenta a maior amplitude de variação, com valores distribuídos desde concentrações relativamente baixas até registros bastante elevados, resultando em um intervalo interquartil amplo e forte assimetria. Esse comportamento indica que o ferro é um componente importante da amostra, porém com distribuição altamente irregular entre os diferentes pontos.

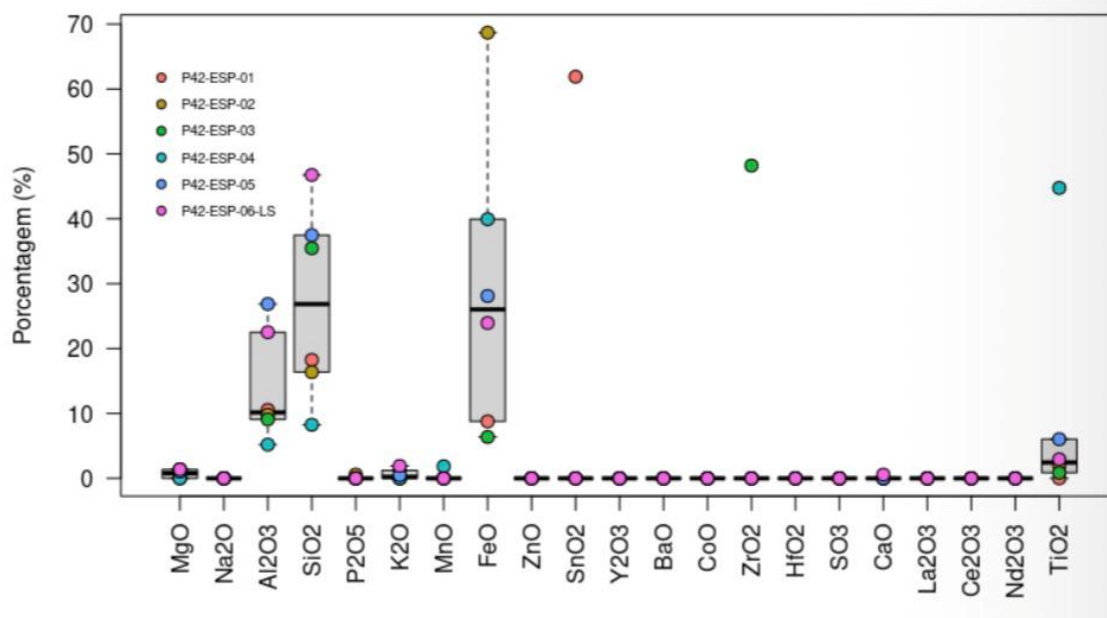
O SiO₂ também exibe dispersão expressiva, com mediana situada em níveis intermediários e ocorrência de valores elevados em alguns registros específicos. A variabilidade observada sugere que, embora o silício seja um dos principais constituintes da amostra, sua concentração não é homogênea ao longo dos pontos analisados.

O Al₂O₃, apresenta distribuição mais concentrada em torno da mediana quando comparado a FeO e SiO₂, ainda que com variações relevantes entre os registros. Esse padrão indica uma participação consistente do alumínio, porém sem uniformidade completa.

Entre os óxidos de concentração intermediária, o TiO₂ destaca-se pela presença de valores isolados elevados, contrastando com observações próximas de

zero na maioria dos registros, caracterizando uma distribuição fortemente assimétrica.

Figura 32 – Boxplot dos óxidos – amostra P42



Fonte: Autor (2026).

Os óxidos MgO, K₂O, MnO, P₂O₅, e CaO apresentam caixas comprimidas próximas de zero, intercaladas por pontos isolados em níveis mais elevados, evidenciando ocorrência pontual e forte sensibilidade a valores extremos.

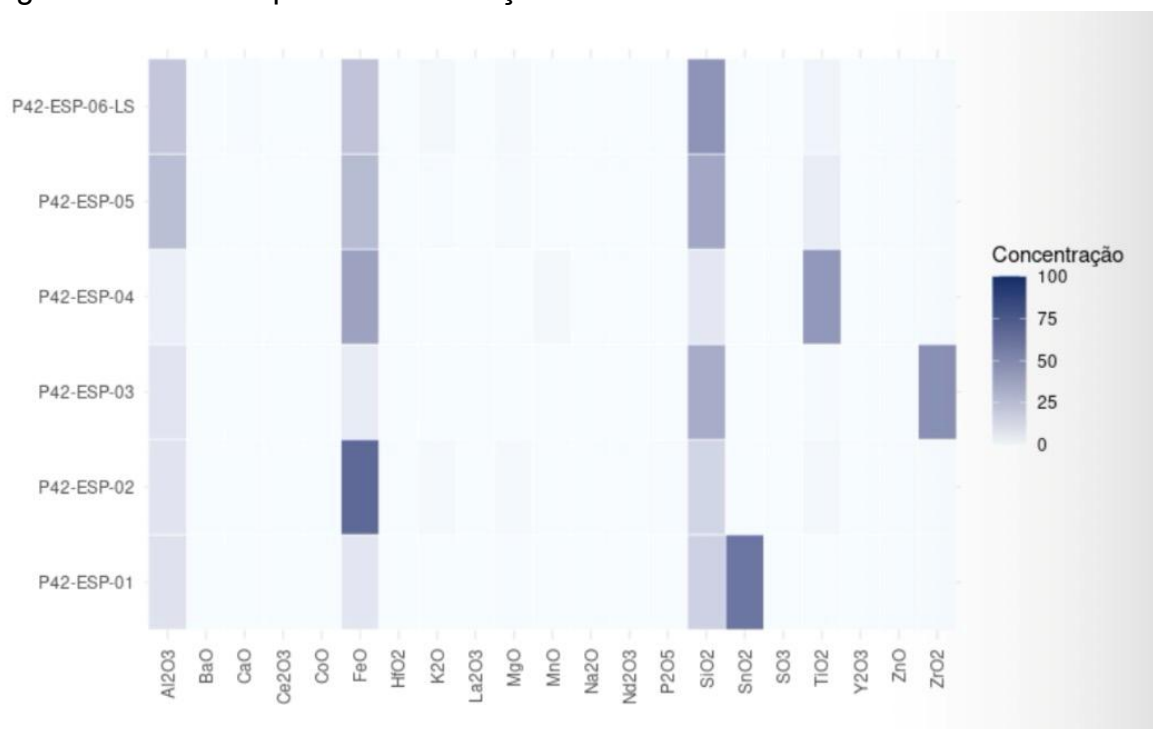
Por outro lado, Na₂O, SO₃, ZnO, Y₂O₃, BaO, HfO₂, CaO e os óxidos de terras raras La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃ mantêm-se concentrados em torno de valores nulos, indicando ausência estatística ou concentrações desprezíveis em todos os registros analisados.

O mapa de calor da amostra AM P42, apresentado Figura 33, evidencia contrastes marcantes entre os diferentes observações analisadas. Os maiores níveis de intensidade concentram-se principalmente nos óxidos FeO e SiO₂, os quais apresentam coloração mais escura em diversos registros, indicando sua contribuição relevante para a composição da amostra. No caso do FeO, observa-se forte variação de intensidade entre os pontos, com registros apresentando concentrações elevadas e outros com valores substancialmente menores, reforçando seu caráter heterogêneo.

O SiO₂ também exibe variações claras entre os registros, com intensidades moderadas a elevadas distribuídas ao longo da amostra, sugerindo participação

consistente, porém não uniforme. O AlO apresenta coloração intermediária na maioria dos pontos, indicando presença recorrente, ainda que com flutuações de concentração.

Figura 33 – Heatmap das concentrações de óxidos da amostra AM P42



Fonte: Autor (2026).

O SnO₂ e o TiO₂ destacam-se por apresentar intensidades elevadas em registros específicos, contrastando com coloração clara na maioria dos demais pontos. Esse padrão confirma a ocorrência pontual desses óxidos e explica os elevados coeficientes de variação observados na análise descritiva.

O ZrO₂ também apresenta enriquecimento localizado, com coloração mais intensa concentrada em poucos registros, enquanto permanece próximo de zero nos demais, caracterizando uma distribuição esparsa.

Óxidos como MgO, K₂O, MnO, P₂O₅, e CaO exibem, em geral, baixas intensidades ao longo de toda a amostra, intercaladas por poucos registros com coloração ligeiramente mais escura, indicando concentrações reduzidas e ocorrência irregular.

Por outro lado, Na₂O, SO₃, ZnO, Y₂O₃, HfO₂, CaO e BaO e os óxidos de terras raras La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃ mantêm coloração uniforme e próxima dos níveis

mínimos, sugerindo ausência estatística ou concentrações desprezíveis em todos os pontos analisados.

5.6 Síntese geral das análises

A análise conjunta das amostras evidencia que a composição geoquímica é dominada por poucos óxidos principais, enquanto a maioria dos constituintes ocorre em baixas concentrações ou de forma pontual. De maneira geral, Al_2O_3 , SiO_2 , FeO e, em algumas amostras, CaO , concentram as maiores médias e exercem maior controle sobre a assinatura composicional dos materiais analisados.

Nas amostras de solo, o Al_2O_3 destaca-se como um dos óxidos mais abundantes, porém com elevada variabilidade, indicando distribuição heterogênea e ocorrência de enriquecimentos localizados. O SiO_2 e o FeO também apresentam teores relevantes em diversas amostras, embora associados, em muitos casos, a altos coeficientes de variação, o que reduz a precisão estatística de suas médias. Óxidos como MnO , ZnO e SnO_2 exibem concentrações elevadas apenas em registros específicos, caracterizando-se como constituintes pontuais e estatisticamente instáveis.

Em contraste, a amostra AM P41 apresenta um comportamento composicional mais bem definido. O SiO_2 , constitui o óxido mais abundante e estatisticamente mais preciso, apresentando alto teor médio e coeficiente de variação muito baixo, o que indica elevada homogeneidade entre os registros. O CaO também se destaca por combinar concentração elevada com alta precisão, reforçando sua importância na composição da amostra. O Al_2O_3 e o FeO apresentam teores significativos, porém com variabilidade moderada, indicando pequenas flutuações entre as observações, sem comprometer seu papel como componentes majoritários.

A análise integrada dos *boxplots* e mapas de calor confirma esses padrões, evidenciando que os óxidos mais abundantes e estatisticamente precisos apresentam distribuições visuais homogêneas, enquanto os óxidos de menor concentração exibem forte assimetria e concentração pontual. Essas representações gráficas permitem distinguir claramente entre constituintes dominantes e óxidos residuais, auxiliando na interpretação da confiabilidade dos valores médios apresentados.

Por fim, é importante ressaltar que a robustez estatística varia entre as amostras. Nas amostras de solo, a elevada dispersão interna limita a

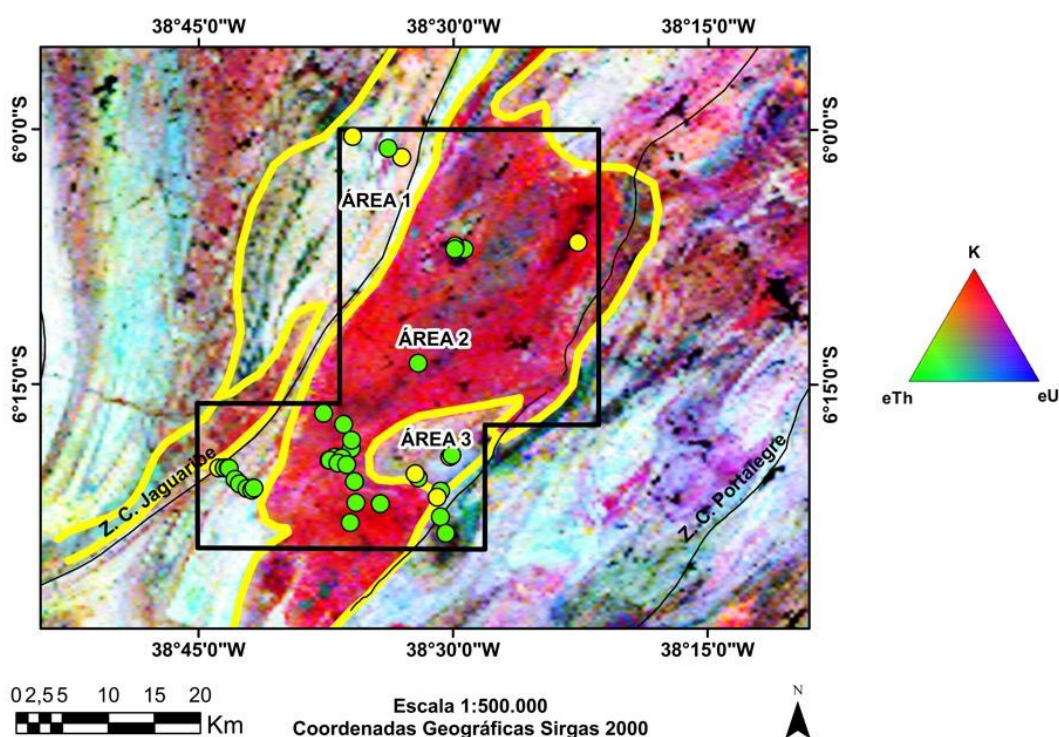
representatividade das medidas centrais, exigindo cautela na comparação direta entre médias. No caso da amostra AM P41 e AM P26, o número reduzido de observações por óxido impõe restrições adicionais, uma vez que pequenas variações absolutas podem influenciar significativamente métricas como desvio-padrão e coeficiente de variação. Assim, os resultados devem ser interpretados como indicativos dos principais padrões composicionais, e não como descrições estatísticas exaustivas.

5.7 Resultados sobre a Geofísica do local de estudo

A interpretação do mapa geológico e dos produtos derivados permitiu a individualização de domínios com características estruturais, litológicas e geoquímicas distintas, controladas principalmente por grandes zonas de cisalhamento regionais. A integração entre o padrão estrutural, as anomalias geofísicas e as observações de campo possibilitou reconhecer áreas com assinaturas favoráveis à concentração de elementos metálicos e elementos terras raras, conforme descrito a seguir.

Figura 34 – Mapa de Aerogamaespectrometria

AEROGAMAESPECTROMETRIA - IMAGEM DE COMPOSIÇÃO TERNÁRIA (K_eTh_eU)



Fonte: Autor (2026).

A Área 1 corresponde a uma faixa esbranquiçada de *trend* regional SW–NE, que acompanha a Zona de Cisalhamento Jaguaribe. Esse domínio é representado principalmente por granitos anorogênicos e pelos augen gnaisses da Suíte Serra do Deserto, refletindo forte controle estrutural na disposição das unidades litológicas. A associação entre rochas graníticas e gnáissicas deformadas sugere um contexto de reativação tectônica, no qual estruturas dúcteis a rúptil-dúcteis influenciaram a distribuição das litologias e dos minerais acessórios.

A Área 2 é marcada pela presença do Batólito Pereiro, com *trend* regional predominantemente Norte–Sul, destacando-se como um corpo intrusivo de grande expressão regional. Essa área caracteriza-se pela ocorrência de rochas de alto teor de potássio, compatíveis com magmatismo diferenciado e evoluído. A assinatura geoquímica potássica, aliada à geometria do batólito, sugere um importante evento magmático, com potencial influência na redistribuição de elementos incompatíveis durante a cristalização.

A Área 3 localiza-se na porção sudeste da área de estudo e destaca-se pela presença de anomalias de tório (Th). Essa área encontra-se inserida na Zona de Cisalhamento Pereiro, evidenciando forte controle estrutural sobre os processos geológicos locais. Observações de campo indicam que os solos são espessos, e que as rochas apresentam intensa epidotização, caracterizando um ambiente fortemente afetado por processos hidrotermais. Além disso, foi constatada a ocorrência de estanho, reforçando o caráter metalogenético da área.

Com base nessas evidências, o professor Clóvis Vaz Parente sugeriu que essa área possa corresponder a um sistema do tipo greisen, associado à alteração hidrotermal de granitos, potencialmente favorável à concentração de elementos como estanho e, secundariamente, elementos terras raras.

6 CONCLUSÃO

O planejamento prévio das atividades de campo, fundamentado na análise cartográfica, no imageamento e na interpretação das anomalias geofísicas de tório (Th), mostrou-se eficaz e adequado aos objetivos do estudo. As atividades de campo foram executadas com êxito em uma única etapa, sendo constatado que todos os acessos previamente traçados em mapa são existentes e transitáveis. As anomalias geofísicas identificadas revelaram-se associadas, ora a solos, ora a materiais rochosos, evidenciando a complexidade dos processos de concentração geoquímica na área investigada.

A estratégia metodológica adotada para o estudo dos elementos terras raras (ETRs) baseou-se na amostragem integrada da rocha fresca, da rocha alterada em diferentes estágios de intemperismo e do solo derivado da decomposição da rocha-mãe. Essa abordagem justifica-se pela possibilidade de fixação e concentração de ETRs durante os processos pedogenéticos, especialmente em ambientes submetidos a intemperismo intenso. As amostras consistiram em aproximadamente 0,500 g de solo e em amostras de mão representativas da rocha, considerando textura e granulometria.

Os resultados indicaram que a fração granulométrica mais fina do solo, inferior a 80 Tyler, não se mostrou a mais eficiente para a detecção de ETRs por meio do MEV-EDS. Em contrapartida, a fração < 0,125 mm apresentou desempenho superior, evidenciado pela maior eficiência na identificação de ETRs nas análises realizadas. No contexto do MEV, verificou-se que a seleção direcionada de partículas mais refletivas nas imagens é fundamental, uma vez que essas partículas frequentemente concentram ETRs e outros metais. Nesse procedimento, foi identificada a presença de estanho em partículas associadas ao diorito do Plúton Poço Dantas.

As análises revelaram a ocorrência de ETRs como ítrio (Y), lantânio (La), neodímio (Nd), cério (Ce) e háfnio (Hf), com destaque para os augen gnaisses da Suíte Serra do Deserto, que apresentaram os resultados mais expressivos. O bário foi detectado tanto na Suíte São Miguel quanto nos dioritos da Suíte Dr. Severiano, indicando enriquecimento localizado desse elemento em diferentes contextos litológicos.

Além dos resultados obtidos por meio das análises MEV-EDS, a síntese estatística das demais análises geoquímicas permitiram reconhecer padrões

composicionais consistentes entre as amostras investigadas. De forma geral, observou-se que a assinatura geoquímica é dominada por poucos óxidos principais, com destaque para SiO_2 , Al_2O_3 e FeO , e, em algumas amostras específicas, CaO , os quais exercem maior controle sobre a composição global dos materiais analisados. Em contraste, a maioria dos demais óxidos ocorre em baixas concentrações ou de forma pontual, refletindo enriquecimentos localizados e elevada heterogeneidade geoquímica.

Nas amostras de solo, verificou-se elevada variabilidade composicional, especialmente para Al_2O_3 , SiO_2 e FeO , o que indica distribuição irregular desses constituintes ao longo dos perfis e limita a representatividade estatística das médias calculadas. Óxidos como MnO , ZnO e SnO_2 apresentaram concentrações elevadas apenas em registros isolados, caracterizando-se como componentes residuais e estatisticamente instáveis. Por outro lado, amostras específicas, como a AM P41, apresentaram comportamento composicional mais homogêneo, com SiO_2 e CaO exibindo elevados teores médios associados a baixos coeficientes de variação, o que reforça a influência de processos hidrotermais, como a epidotização, na modificação química dessas rochas.

A análise integrada por meio de boxplots e mapas de calor corroborou esses resultados, evidenciando que os óxidos dominantes apresentam distribuições mais homogêneas e estatisticamente confiáveis, enquanto os constituintes de menor concentração exibem forte assimetria e concentração pontual. Assim, os resultados estatísticos devem ser interpretados como indicativos dos principais padrões composicionais e tendências geoquímicas, e não como descrições quantitativas exaustivas, especialmente em função da elevada dispersão interna das amostras de solo e do número reduzido de observações em algumas análises.

Por fim, recomenda-se a realização de novos estudos analíticos utilizando técnicas quantitativas de maior precisão, como Fluorescência de Raios X (XRF) e Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), visando aprofundar a investigação sobre a presença e a distribuição dos ETRs. Tais estudos são especialmente indicados para áreas com evidências de hidrotermalismo, como o Plúton Poço Dantas, e para os augen gnaisses da Suíte Serra do Deserto, que demonstraram maior potencial para concentração desses elementos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **A questão da água no Nordeste**. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61861/1/agua-nordeste.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2026.
- ALBUQUERQUE, Diêgo Souza; XAVIER, Rafael Albuquerque; SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. Compartimentação Geomorfológica do Maciço do Pereiro e entorno, Nordeste Setentrional do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 3, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Rafael-Xavier-4/publication/383256398_Geomorphological_Compartmentation_of_Pereiro_Massif_and_its_surroundings_in_Northern_Northeast_of_Brazil/links/66c49e0d4b25ef677f71f4b0/Geomorphological-Compartmentation-of-Pereiro-Massif-and-its-surroundings-in-Northern-Northeast-of-Brazil.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.
- ALMEIDA, Afonso Rodrigues de; PARENTE, Clovis Vaz; ARTHAUD, Michel Henry. **Geologia da Folha Boa Viagem SB.24-VD-II**. Brasília: CPRM, 2008.
- ALMEIDA, L. M. A; MEDEIROS, J. F. Uso e Ocupação do solo nos Planaltos Residuais do Extremo Oeste Potiguar. *Revista Geografia em Atos (Online)*, v. 5, p. 1-18, Outubro/2021.
- AMORIM, Jaquelynnne Cássia de. **Potencial geológico e mineral de elementos terras raras na Paraíba**: caracterização física e química. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/27099>. Acesso em: 09 jan. 2026.
- ARAÚJO, M. N. C.; DA SILVA, F. C A.; DE SÁ, E. F. J. Pegmatite emplacement in the Seridó Belt, northeastern Brazil: late stage kinematics of the Brasiliano orogen. **Gondwana Research**, v. 4, n. 1, p. 75-85, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/27099>. Acesso em: 12 jan. 2026.
- BACELAR, Vitória. Piauí está entre os 12 estados do Brasil que possuem 'terras raras', aponta estudo. **G1**, 28 de julho de 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/pi/piaui/noticia/2025/07/28/piaui-esta-entre-os-12-estados-do-brasil-que-possuem-terras-raras-aponta-estudo.ghtml>. Acesso em: 09 jan. 2026.
- BELTRÃO, Breno Augusto *et al.* **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado do Rio Grande do Norte**: diagnóstico do município de Doutor Severiano. Recife: CPRM, 2005.
- BOJKO, A. **Informative or misleading? heatmaps deconstructed**. In: SPRINGER. International conference on human-computer interaction. [S.l.], 2009, p. 30–39.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento Por Água Subterrânea. **Diagnóstico do Município de São Miguel, estado do Rio Grande do Norte**. Recife, 2005. Disponível em:

<https://rigeo.sgb.gov.br/server/api/core/bitstreams/2bd9c246-5ea1-40d6-815d-ef9b3bfeb05c/content>. Acesso em: 22 jan. 2026.

CANUTO, Livia Teixeira; DE OLIVEIRA, Adélia Augusta Souto. Métodos de revisão bibliográfica nos estudos científicos. **Psicologia em revista**, v. 26, n. 1, p. 83-102, 2020. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/psicologiaemrevista/article/download/12005/18070>. Acesso em: 09 jan. 2026.

CASTELLANO, Gabriel Ribeiro. **Terras raras no solo em associações graníticas e metamórficas (nappe Varginha-Guaxupé) na Mata Atlântica: uso da terra, material parental e propriedades físico-químicas**. 2025. Tese (Doutor em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista “Júlio ode Mesquita Filho”, Rio Claro, 2025. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/8d68903d-1224-4ab4-9d74-b4ebe72028cb>. Acesso em: 09 jan. 2026.

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE). **Reestruturação e atualização do mapeamento do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará – zona costeira e unidades de conservação costeiras**. Relatório final de caracterização ambiental e dos mapeamentos. Fortaleza, 2016. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2016/12/RELATÓRIO-CARACTERIZAÇÃO-AMBIENTAL-E-DOS-MAPEAMENTOS.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

CLIMA TEMPO. **São Miguel (RN)**. 2026. Disponível em: https://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/15-dias/cidade/2056/saomiguel-rn#google_vignette. Acesso em: 08 jan. 2026.

DE PAIVA, L. M. F.; DE MEDEIROS, J. F. Diagnóstico geoambiental do município de Marcelino Vieira, RN. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, v. 21, n. 2, p. 175–191, 2019. Disponível em: [//rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/481](http://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/481). Acesso em: 10 jan. 2026.

DENTITH, M.; MUDGE, S. T. **Geophysics for Information Professionals: Applied Geophysics for Geologists and Engineers**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Neossolos Litólicos**. Agência de Informação Tecnológica – Solos Tropicais. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos/neossolos-liticos>. Acesso em: 21 jan. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Argissolos Vermelho-Amarelos**. Agência de Informação Tecnológica – Solos Tropicais. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/argissolos/argissolos-vermelho-amarelos>. Acesso em: 21 jan. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Neossolos Litólicos**. Agência de Informação Tecnológica – Solos Tropicais. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: [Neossolos Litólicos - Portal Embrapa](#). Acesso em: 21 jan. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Luvissolos Crômicos**. Agência de Informação Tecnológica – Solos Tropicais. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/luvissolos/luvissolos-cromicos>. Acesso em: 21 jan. 2026.

FARIA, Luiz Filipe de Melo; MEIRA, Vinícius Tieppo; SCHIAVETTI, Lucas Rodrigues. Petrogênese de rochas gabroicas do plúton São Gabriel de Baunilha, orógeno Araçuaí, Espírito Santo. **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP**, n. 26, 2018. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/w5hvo54u7vdd7nfbgdopd6rrma/access/wayback/https://econtents.bc.unicamp.br/eventos/index.php/pibic/article/download/931/1001>. Acesso em: 12 jan. 2026.

FIGUEIREDO FILHO, Orlando Augusto. **Geoquímica e geocronologia e metavulcânicas e metagranitóides dos cinturões Orós e Jaguaribe sudeste e Ceará**. 1994. 161 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-22062015-143731/publico/Figueiredo_Filho_Doutorado.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

FONTANA, Eduardo *et al.* Caracterização geoquímica e petrogenética dos Granitoides Arroio Divisa, região de Quitéria, Rio Grande do Sul. *Geologia USP. Série Científica*, v. 12, n. 3, p. 33-56, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Maria-De-Fatima-Bitencourt/publication/237044642_Caracterizacao_Geoquimica_e_Petrogenetica_dos_Granitoides_Aroio_Divisa_Regiao_de_Quiteria_Rio_Grande_do_Sul/links/0deec51af8b411ad88000000/Caracterizacao-Geoquimica-e-Petrogenetica-dos-Granitoides-Aroio-Divisa-Regiao-de-Quiteria-Rio-Grande-do-Sul.pdf. Acesso em: 12 jan. 2026.

GARCES, Alexsandro dos Santos. **Prospecção de água subterrânea por eletrorresistividade em terrenos cristalinos**. 2019. 93 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-22062015-143731/publico/Figueiredo_Filho_Doutorado.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

GREENWOOD, N. M.; EARNSHAW, A. **Chemistry of the Elements**. UK: Pergamon Press, 1984.

GSCHNEIDNER JR., K. A.; CAPELLEN, J. **Two Hundred Years of Rare Earths, 1787-1987**. Amsterdã: North Holland, 1987.

GU, Z.; EILS, R.; SCHLESNER, M. **Complex heatmap visualization**. iMeta, 2022.

HENRICHES, Isadora A. *et al.* Caracterização e geocronologia SHRIMP U-Pb em zircão das rochas subvulcânicas do sistema pórfiro Yarumalito, Distrito de Marmato, Colômbia. **Pesquisas em Geociências**, v. 41, n. 3, p. 231-242, 2014. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002845668>. Acesso em: 12 jan. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**. IAEA-TECDOC-1363. Vienna, 2003.

KRZYWINSKI, M.; ALTMAN, N. Visualizing samples with box plots: use box plots to illustrate the spread and differences of samples. **Nature Methods, Nature Publishing Group**, v. 11, n. 2, p. 119–121, 2014. Disponível em: <https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA361242515&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=15487091&p=HRCA&sw=w>. Acesso em: 29 jan. 2026.

LAGES, Geysson de Almeida *et al.* Geocronologia e aspectos estruturais e petrológicos do Pluton Bravo, Domínio Central da Província Borborema, Nordeste do Brasil: um granito transalcalino precoce no estágio pós-colisional da Orogênese Brasileira. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, n. 01, p. 41-61, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150033>. Acesso em: 12 jan. 2026.

LEE, J. D.; **Química Inorgânica não tão concisa**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda.: São Paulo, 1999.

LIMA, Haroldo Monteiro. **Petrologia e geoquímica de ortognaisses sieníticos alcalinos do tipo A de Terra Nova-PE, Terreno Rio Capibaribe, Província Borborema**. 2013. 73 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: https://www.lareferencia.info/vufind/Record/BR_8c4a094863a7b0e996bf935cdabf1a55. Acesso em: 09 jan. 2026.

LIMA, Viviane Nogueira; DE SOUZA, Maria Losângela Martins. Caracterização geoambiental do município de Coronel João Pessoa–RN. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 11, n. 4, p. 1007-1025, 2022. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/rbpd/article/view/15168>. Acesso em: 10 jan. 2026.

LOGCOMEX. A importância estratégica das Terras Raras e o papel do Brasil. **Logcomex** [online]. Publicado em 8 jul. 2024. Disponível em: <https://blog.logcomex.com/terras-raras-brasil>. Acesso em: 10 jan. 2026.

LOUREIRO, F. E. L. **Terras raras: onde** e porque prospectá-las; tipos de jazimentos; perspectivas mercadológicas. Rio de Janeiro: CPRM, 1988.

LOUREIRO F. E. L. **Terras-Raras no Brasil: Depósitos, recursos identificados e reservas**. Rio de Janeiro: MCT-CNPq-CETEM, 1994.

MAGINI, Christiano. **Evolução pré-cambriana da Província Borborema: o extremo oeste Potiguar**. 2001. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas–UNESP.

MAGINI, Christiano; HACKSPACHER, Peter C. Geoquímica e ambiência tectônica do arco magmático de Pereiro, região NE da Província Borborema. **Brazilian Journal of Geology**, v. 38, n. 2, p. 336-355, 2008. Disponível em: <http://bjg.siteoficial.ws/2008/n.2/j.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.

MAIA, Rubson P.; BEZERRA, Francisco H. R. Condicionamento estrutural do relevo no Nordeste setentrional brasileiro. **Mercator**, v. 13, n. 1, p. 127-141, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mercator/a/5m6RBtnSGZpLC7VJR95bQzy/?lang=pt>. Acesso em: 09 jan. 2026.

MALISKA, Ana Maria. **Microscopia eletrônica de varredura**. Florianópolis: Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

MARINHO, Douglas Yusuf; ESPINOSA, José Waldo Martínez; SILVA, André Carlos. Os elementos terras raras e seu papel em uma sociedade sustentável. **Simpósio de Engenharia de Produção Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão**, 2018. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/1012/o/Douglas_Yusuf_Marinho.pdf. Acesso em: 09 jan. 2026.

MEDEIROS, João Victor Frazão de; PAULA, Rafael Nascimento. **Mapeamento geológico da Bacia Catolé-São Julião e suas ocorrências de cobre, Piauí-Brasil**. 2019. 132 f. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341914022_Mapeamento_geologico_da_Bacia_Catole-Sao_Juliao_e_suas_ocorrencias_de_cobre_Piaui_-Brasil. Acesso em: 10 jan. 2026.

MELO, Filipe Reis. A geopolítica das terras raras. **Carta Internacional**, v. 12, n. 2, p. 219-243, 2017. Disponível em: <https://www.cartainternacional.abri.org.br/Carta/article/view/634>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MOELLER, T. **The Chemistry of the Lanthanides**: Pergamon Texts in Comprehensive Inorganic Chemistry. New York: Pergamon Press: 1975.

MORALES, Luiz Fernando Grafulha; HINRICHS, Ruth; FERNANDES, Luís Alberto D.Ávila. A técnica de difração de elétrons retro-espalhados (EBSD) em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e sua aplicação no estudo de rochas deformadas. **Pesquisas em Geociências**, v. 34, n. 1, 2007, p. 19-34, 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/22633>. Acesso em: 29 jan. 2026.

MORATO, Victor de O. **A importância dos elementos de Terras Raras para o mercado brasileiro e internacional**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás. Catalão, 2019. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/710/o/VICTOR_DE_OLIVEIRA_MORATO.pdf. Acesso em: 02 jan. 2026.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

MORGAVI, Daniele *et al.* Decrypting magma mixing in igneous systems. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 87, n. 1, p. 607-638, 2022. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/rimg/article-abstract/87/1/607/613282/Decrypting-Magma-Mixing-in-Igneous-Systems>. Acesso em: 12 jan. 2026.

NÉDÉLEC, A.; BOUCHEZ, J. L. Genesis of hybrid granitoids: Mingling and mixing. **Granites: Petrology, Structure, Geological Setting and Metallogeny**, p. 58-72, 2015. Disponível em: <https://academic.oup.com/book/27088/chapter-abstract/196431994?redirectedFrom=fulltext&login=false>. Acesso em: 10 jan. 2026.

NOGUEIRA, Israel Salles; MOREIRA, Victor Saulo. **Mapeamento Geológico da Bacia de Alagoinha do Piauí e ocorrências minerais associadas, Piauí - Brasil**. 2021. 90 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/68694>. Acesso em: 10 jan. 2026.

PARENTE, Clóvis Vaz; ARTHAUD, MICHEL HENRI. O Sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 4, p. 297-305, 1995. Disponível em: <http://www.bjg.siteoficial.ws/1995/n.4/6.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2026.

PINÉO, Tércyo Rinaldo Gonçalves (Org.). **Geologia e recursos minerais da folha Banabuiú: SB.24-X-C-I**. Fortaleza: CPRM, 2017. Escala 1:100.000.

PITCHER, W.S. Granite Type and Tectonic Environment. In: HSU, K. (Org.). **Mountain Building Processes**. Londres: Academic Press, 1983, 19-40.

PREFEITURA DE SÃO MIGUEL. **Acesso a informação**. 2026. Disponível em: <https://www.saomiguel.rn.gov.br/acessoainformacao.php>. Acesso em: 09 jan. 2026.

RABELO, D. R.; VIDAL, D. B.; SANTOS, M. R. da S.; FRASCARELI, D. Processos exógenos na formação da depressão sertaneja do sertão central do estado do Ceará, Brasil / Exogeneous processes in formation of depression sertaneja central State of Ceará. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 5, n. 1, p. 835-841, 2022. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/44432>. Acesso em: 27 jan. 2026.

RÊGO, Alana Ticiane Alves do *et al.* Análise integrada da paisagem na bacia hidrográfica de Coronel João Pessoa/RN. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 7, p. 321-337, 2020. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.007.0027>. Acesso em: 10 jan. 2026.

ROLLINSON, H. R. **Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation**. Harlow: Longman, 1993.

SÁ, J. M. 1991. **Evolution geodynamique de la ceinture protérozoïque d'Orós, Nord-Est du Brésil**. Thèse de doctorat de 1^o Université de Nancy 1, 117p (Inéd.). Disponível em: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747824>. Acesso em: 10 jan. 2026.

SANTOS, Celia Aparecida Lino dos; PANOSSIAN, Zehbour. Revisão bibliográfica sobre metais de terras raras. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 4, 2017. Disponível em: https://revista.ipt.br/revistaIPT/pt_BR/article/view/34. Acesso em: 9 jan. 2026.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBREAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. ISBN 978-85-7035-817-2. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 21 jan. 2026.

SANTOS, Humberto G.; ZARONI, Maria José; ALMEIDA, Eliane de Paula C. Argissolos Vermelho-Amarelo. **Embrapa** [online]. Publicado em 9 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/argissolos/argissolos-vermelho-amarelos>. Acesso em: 27 jan. 2026.

SANTOS, Júlio Edstron Secundino. Mineração de terras raras no Brasil: construindo um futuro melhor. **Revista DCS**, v. 22, n. 81, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistadcs.com/index.php/revista/article/view/3163>. Acesso em: 9 jan. 2026.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). Serviço Geológico do Brasil esclarece dúvidas sobre potencial do país para terras raras e minerais estratégicos. **Gov** [online]. Publicado em 6 ago. 2025. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/w/servico-geologico-do-brasil-esclarece-duvidas-sobre-potencial-do-pais-para-terras-raras-e-minerais-estrategicos>. Acesso em: 22 jan. 2026.

SINHA, S. P.; **Complexes of the Rare Earths**. New York: Pergamon Press, 1966.

SOUSA FILHO, Paulo C. de; GALAÇO, Ayla RBS; SERRA, Osvaldo A. TERRAS RARAS: tabela periódica, descobrimento, exploração no Brasil e aplicações. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1208-1224, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170438>. Acesso em: 9 jan. 2026.

SOUZA, Laécio Cunha de *et al.* (Orgs.). **Geologia e Recursos Minerais da Folha Pau dos Ferros SB.24-Z-A-II Escala 1:100.000**. Rio Grande do Norte: CPRM, 2017.

STRECKEISEN, Albert. To each plutonic rock its proper name. **Earth-science reviews**, v. 12, n. 1, p. 1-33, 1976. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0012825276900520>. Acesso em: 10 jan. 2026.

TAKEHARA, L.; SILVEIRA, F. V. Avaliação do Potencial de Terras-Raras no Brasil. In: MARTINS, C. *et al.* (Orgs.). **Minerais Estratégicos e Terras-Raras**. Centro de

Documentação e Informação; Edições Câmara. Brasília, DF, Série estudos estratégicos, 2014.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

UVULA, Eduardo Ernesto. **Caracterização isotópica e cristalográfica das grafitas da Faixa Orós, nordeste do Brasil**. 2023. 74 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/76374>. Acesso em: 12 jan. 2026.

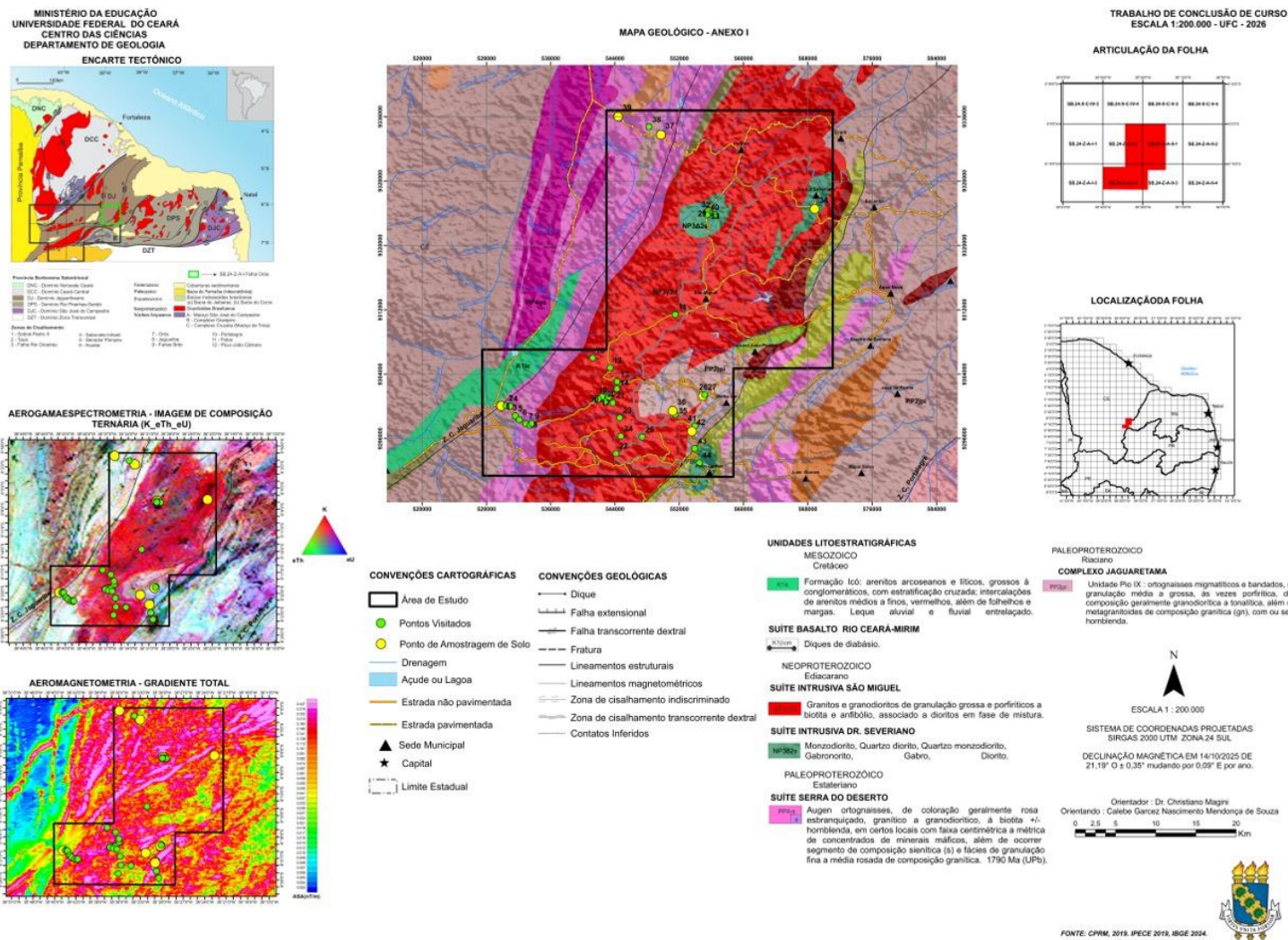
VIEIRA, Maria Eduarda Martins *et al.* X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) coupled with scanning electron microscope (SEM): fundamentals and applications in dairy products. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 10, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/18622>. Acesso em: 29 jan. 2026.

WILLIAMSON, D. F.; PARKER, R. A.; KENDRICK, J. S. The box plot: A simple visual method to interpret data. **Annals of Internal Medicine**, v. 110, n. 11, p. 916–921, 1989. Disponível em: <https://www.acpjournals.org/doi/abs/10.7326/0003-4819-110-11-916>. Acesso em: 29 jan. 2026

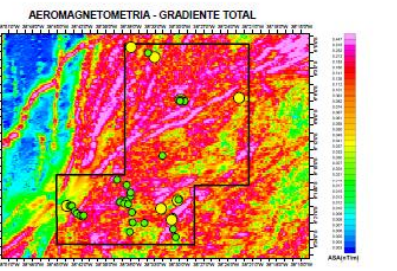
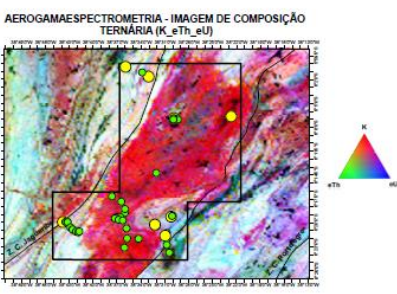
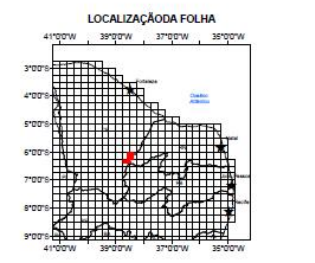
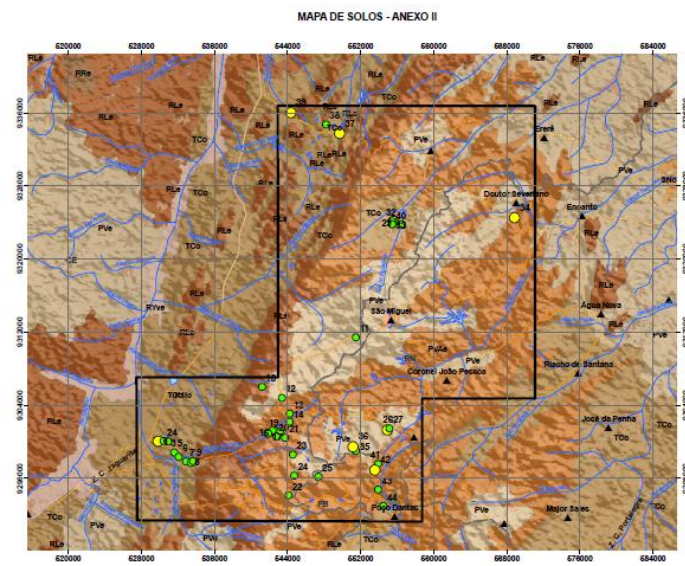
ZHDANOV, M. S. (Ed.). **Geophysics for Mineral Exploration**. Basel: MDPI, 2021.

ANEXOS

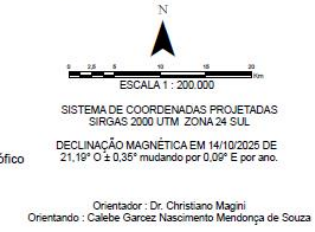
Anexo 1 – Mapa Geológico



Anexo 2 – Mapa de Solos



- | | | |
|---|---|---|
| CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS | CONVENÇÕES GEOLÓGICAS | LEGENDA DE SOLOS |
| <ul style="list-style-type: none"> Área de Estudo Pontos Visitados Ponto de Amostragem de Solo Drenagem Agude ou Lagoa Estrada não pavimentada Estrada pavimentada Sede Municipal Capital Limite Estadual | <ul style="list-style-type: none"> Dique Falha extensional Falha transcorrente dextral Fratura Lineamentos estruturais Lineamentos magnetométricos Zona de cisalhamento indiscriminado Zona de cisalhamento transcorrente dextral Contatos ínfimos | <ul style="list-style-type: none"> PVe - Argissolo Vermelho Eutrófico TCo - Luvissoilo Crômico Órtico RLe - Neossolo Litólico Eutrófico PVeA - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico |



FONTE: CPRM, 2019. IPECE 2019, IBGE 2024.

PONTO 26	P26-ESP-01	P26-ESP-02- LÂMINA-SOLO
Magnesium - MgO	5,880	1,334
Sodium - Na ₂ O	0,000	0,000
Aluminum - Al ₂ O ₃	20,875	28,000
Silicon - SiO ₂	42,842	53,323
Phosphorus - P ₂ O ₅	0,000	0,000
Potassium - K ₂ O	6,375	2,070
Manganese - MnO	0,000	0,000
Iron - FeO	21,558	13,703
Zinco - ZnO	0,000	0,000
Estanho - SnO ₂	0,000	0,000
Barium - BaO	0,000	0,000
Cobalt - CoO	0,000	0,000
Zirconium - ZrO ₂	0,000	0,000
Hafnium - HfO ₂	0,000	0,000
Enxofre - SO ₃	0,000	0,000
Calcium - CaO	0,000	0,000
Lanthanum - La ₂ O ₃	0,000	0,000
Cerium - Ce ₂ O ₃	0,000	0,000
Neodymium - Nd ₂ O ₃	0,000	0,000
Titanium - TiO ₂	2,47	1,571
Element	Compound %	Compound %

PENEIRA	Malha	
Abertura (mm)	ASTM	Tyler
0,125	120	115
0,112	Material passante	

PONTO 28	P28-ESP-01	P28-ESP-02	P28-ESP-03	P28-ESP-04	P28-ESP-05- LÂMINA-SOLO
Magnesium - MgO	0,000	1,196	0,000	0,000	0,860
Sodium - Na ₂ O	0,632	0,000	0,000	0,000	1,522
Aluminum - Al ₂ O ₃	4,178	16,151	10,282	4,503	20,196
Silicon - SiO ₂	9,283	42,987	14,682	8,783	55,671
Phosphorus - P ₂ O ₅	0,000	0,000	2,055	0,000	0,000
Potassium - K ₂ O	0,814	3,577	0,685	0,766	4,555
Manganese - MnO	0,000	0,000	0,938	0,000	0,000
Iron - FeO	2,913	29,501	71,358	1,901	14,505
Zinco - ZnO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Estanho - SnO ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Barium - BaO	53,229	0,000	0,000	55,924	0,000
Cobalt - CoO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zirconium - ZrO ₂	0,000	4,259	0,000	0,000	0,000
Hafnium - HfO ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Enxofre - SO ₃	28,951	0,000	0,000	28,112	0,000
Calcium - CaO	0,000	0,000	0,000	0,000	1,448
Lanthanum - La ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cerium - Ce ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Neodymium - Nd ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Titanium - TiO ₂	0,000	2,330	0,000	0,000	1,244
Element	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %

PENEIRA	Malha	
Abertura (mm)	ASTM	Tyler
0,125	120	115
0,112	Material passante	

142

PONTO 36	P36-ESP-01	P36-ESP-02	P36-ESP-03	P36-ESP-04- LÂMINA-SOLO
Magnesium - MgO	0,938	1,965	1,082	4,285
Sodium - Na2O	0,000	0,000	0,000	0,000
Aluminum - Al2O3	4,108	9,132	4,198	13,817
Silicon - SiO2	9,119	19,534	12,520	50,513
Phosphorus - P2O5	0,000	0,000	0,000	0,000
Potassium - K2O	0,000	0,000	0,389	1,600
Manganese - MnO	0,000	0,000	54,641	0,000
Iron - FeO	4,023	10,498	10,914	27,379
Zinco - ZnO	0,000	0,000	0,000	0,000
Estanho - SnO2	81,812	58,872	0,000	0,000
Barium - BaO	0,000	0,000	16,257	0,000
Cobalt - CoO	0,000	0,000	0,000	0,000
Zirconium - ZrO2	0,000	0,000	0,000	0,000

Hafnium - HfO ₂	0,000	0,000	0,000	0,000
Enxofre - SO ₃	0,000	0,000	0,000	0,000
Calcium - CaO	0,000	0,000	0,000	1,049
Lanthanum - La ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000
Cerium - Ce ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000
Neodymium - Nd ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000
Titanium - TiO ₂	0,000	0,000	0,000	1,356
Element	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %

PONTO 37	P37-ESP-01	P37-ESP-02	P37-ESP-03	P37-ESP-04	P37-ESP-05	P37-ESP-06	P37-ESP-07- LÂMINA-SOLO
Magnesium - MgO	0,000	0,449	0,000	0,000	0,000	0,000	1,580
Sodium - Na2O	0,000	0,905	1,941	1,044	0,959	1,165	2,015
Aluminum - Al2O3	6,250	7,329	18,825	6,040	7,340	6,140	20,543
Silicon - SiO2	36,508	15,523	49,496	11,769	13,789	13,076	56,162
Phosphorus - P2O5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Potassium - K2O	0,970	0,892	3,154	0,506	0,518	0,463	4,244
Manganese - MnO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Iron - FeO	4,557	74,901	20,206	80,640	77,393	78,478	13,547
Zinco - ZnO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Estanho - SnO2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Barium - BaO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cobalt - CoO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zirconium - ZrO2	51,716	0,000	6,379	0,000	0,000	0,000	0,000
Hafnium - HfO2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Enxofre - SO3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Calcium - CaO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,811
Lanthanum - La2O3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cerium - Ce2O3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Neodymium - Nd2O3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Titanium - TiO2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,678	1,097
Element	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %

PONTO 3G	P3G-ESP-01	P3G-ESP-02	P3G-ESP-03	P3G-ESP-04	P3G-ESP-05	P3G-ESP-06- LÂMINA-SOLO
Magnesium - MgO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sodium - Na2O	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,788
Aluminum - Al2O3	21,326	6,318	9,165	23,467	9,675	22,804
Silicon - SiO2	19,324	36,205	25,111	34,601	38,524	55,188
Phosphorus - P2O5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Potassium - K2O	1,762	0,611	0,000	3,191	1,604	4,939
Manganese - MnO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Iron - FeO	9,855	5,343	6,604	11,301	5,331	15,095
Zinco - ZnO	0,000	0,000	1,457	0,000	0,000	0,000
Estanho - SnO2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Barium - BaO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cobalt - CoO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zirconium - ZrO2	0,000	50,780	0,000	0,000	44,866	0,000
Hafnium - HfO2	0,000	0,743	0,000	0,000	0,000	0,000
Enxofre - SO3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Calcium - CaO	0,000	0,000	0,932	0,000	0,000	0,000
Lanthanum - La2O3	0,000	0,000	33,325	14,864	0,000	0,000
Cerium - Ce2O3	47,733	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Neodymium - Nd2O3	0,000	0,000	12,465	12,576	0,000	0,000
Yttrium - Y2O3	0,000	0,000	10,940	0,000	0,000	0,000
Titanium - TiO2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,186
Element	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %

PENEIRA	Malha	
Abertura (mm)	ASTM	Tyler
0,125	120	115
0,112	Material passante	

146

PONTO 41	P41-ESP-01	P41-ESP-02- LÂMINA-SOLO
Magnesium - MgO	0,000	0,759
Sodium - Na2O	0,000	0,000
Aluminum - Al2O3	23,630	18,465
Silicon - SiO2	44,294	44,935
Phosphorus - P2O5	0,000	0,000
Potassium - K2O	0,000	0,000
Manganese - MnO	0,000	0,000
Iron - FeO	11,620	15,555
Zinco - ZnO	0,000	0,000
Estanho - SnO2	0,000	0,000
Barium - BaO	0,000	0,000
Cobalt - CoO	0,000	0,000
Zirconium - ZrO2	0,000	0,000
Hafnium - HfO2	0,000	0,000
Enxofre - SO3	0,000	0,000
Calcium - CaO	20,455	20,285
Lanthanum - La2O3	0,000	0,000
Cerium - Ce2O3	0,000	0,000
Neodymium - Nd2O3	0,000	0,000
Titanium - TiO2	0,000	0,000
Element	Compound %	Compound %

PONTO 42	P42-ESP-01	P42-ESP-02	P42-ESP-03	P42-ESP-04	P42-ESP-05	P42-ESP-06- LÂMINA-SOLO
Magnesium - MgO	0,537	1,412	0,000	0,000	1,044	1,369
Sodium - Na ₂ O	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Aluminum - Al ₂ O ₃	10,541	9,784	9,082	5,197	26,868	22,524
Silicon - SiO ₂	18,248	16,368	35,467	8,260	37,475	46,756
Phosphorus - P ₂ O ₅	0,000	0,587	0,000	0,000	0,000	0,000
Potassium - K ₂ O	0,000	1,222	0,000	0,000	0,467	1,903
Manganese - MnO	0,000	0,000	0,000	1,846	0,000	0,000
Iron - FeO	8,777	68,684	6,376	39,945	28,108	23,939
Zinco - ZnO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Estanho - SnO ₂	61,897	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Barium - BaO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cobalt - CoO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zirconium - ZrO ₂	0,000	0,000	48,201	0,000	0,000	0,000
Hafnium - HfO ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Enxofre - SO ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Calcium - CaO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,578
Lanthanum - La ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cerium - Ce ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Neodymium - Nd ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Titanium - TiO ₂	0,000	1,942	0,874	44,752	6,038	2,932
Element	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %	Compound %

Anexo 5 – Tabela Pontos visitados

Área percorrida 1.373 hectares.		
PONTO	LITOLOGIA	SOLO
1	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
2	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
3	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
4	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
5	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
6	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
7	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
8	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
9	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvissole Crômico Órtico
10	Suíte Intrusiva São Miguel	RLe - Neossolo Litólico Eutrófico
11	Suíte Intrusiva São Miguel	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
12	Suíte Intrusiva São Miguel	PVe - Argissolo Vermelho Eutrófico
13	Suíte Intrusiva São Miguel	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
14	Suíte Intrusiva São Miguel	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
15	Suíte Intrusiva São Miguel	RLe - Neossolo Litólico Eutrófico
16	Suíte Intrusiva São Miguel	RLe - Neossolo Litólico Eutrófico
17	Suíte Intrusiva São Miguel	RLe - Neossolo Litólico Eutrófico
18	Suíte Intrusiva São Miguel	RLe - Neossolo Litólico Eutrófico
19	Suíte Intrusiva São Miguel	RLe - Neossolo Litólico Eutrófico
20	Suíte Intrusiva São Miguel	RLe - Neossolo Litólico Eutrófico
21	Suíte Intrusiva São Miguel	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
22	Suíte Intrusiva São Miguel	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
23	Suíte Intrusiva São Miguel	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
24	Suíte Intrusiva São Miguel	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
25	Suíte Intrusiva São Miguel	PVe - Argissolo Vermelho Eutrófico
26	Complexo Jaguaretama	PVe - Argissolo Vermelho Eutrófico
27	Complexo Jaguaretama	PVe - Argissolo Vermelho Eutrófico
28	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	TCo - Luvissole Crômico Órtico
29	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	TCo - Luvissole Crômico Órtico
30	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	TCo - Luvissole Crômico Órtico
31	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	TCo - Luvissole Crômico Órtico

32	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	TCo - Luvisolo Crômico Órtico
33	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	TCo - Luvisolo Crômico Órtico
34	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
35	Complexo Jaguaretama	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
36	Complexo Jaguaretama	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
37	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvisolo Crômico Órtico
38	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvisolo Crômico Órtico
39	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo - Luvisolo Crômico Órtico
40	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	TCo - Luvisolo Crômico Órtico
41	Complexo Jaguaretama	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
42	Complexo Jaguaretama	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
43	Complexo Jaguaretama	PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
44	Suíte Intrusiva Poço Dantas	TCo - Luvisolo Crômico Órtico

Fonte: Autor (2026).

Anexo 6 – Tabela dos Pontos onde foram coletadas amostras do solo e rocha encaminhados para análise MEV-EDS

Qtd. Amostra	Ponto	Litologia	Solo	Observações
1	1	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	Amostra de solo
2	26	Complexo Jaguaretama	PVe – Argissolo Vermelho Eutrófico	Amostra de solo
3	28	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	Amostra de solo
4	34	Suíte Intrusiva Dr. Severiano	PVAe – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Amostra de solo
5	36	Complexo Jaguaretama	PVAe – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Amostra de solo
6	37	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	Amostra de solo
7	39	Suíte Intrusiva Serra do Deserto	TCo – Luvisolo Crômico Órtico	Amostra de solo
8	41	Complexo Jaguaretama	PVAe – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Amostra de rocha
9	42	Complexo Jaguaretama	PVAe – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Amostra de solo

Fonte: Autor (2026).

Anexo 7 – Análises do material passante das peneiras ASTM80 e ASTM120 no MEV-EDS

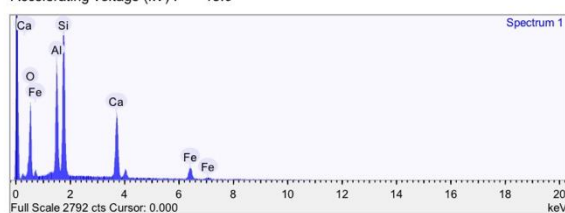
P41 – Rocha



2mm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

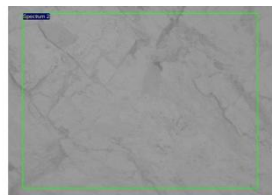


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

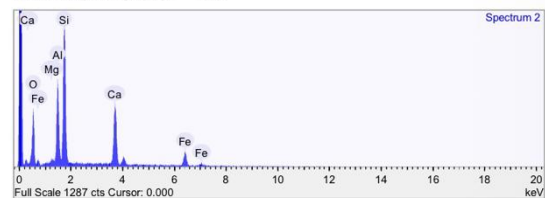
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	12.506	0.167	10.479	23.630	Al ₂ O ₃
Silicon	20.705	0.213	16.666	44.294	SiO ₂
Calcium	14.619	0.193	8.246	20.455	CaO
Iron	9.033	0.280	3.657	11.620	FeO
Oxygen	43.136	0.287	60.953		



2mm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0



Quantification Settings

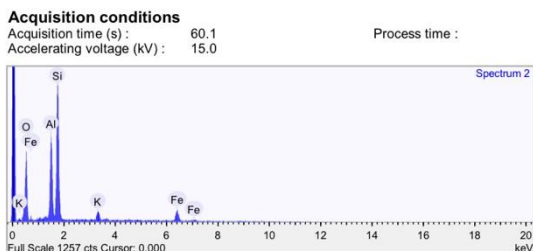
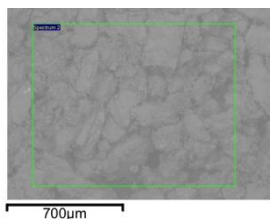
Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.458	0.122	0.434	0.759	MgO
Aluminum	9.773	0.235	8.340	18.465	Al ₂ O ₃
Silicon	21.005	0.322	17.219	44.935	SiO ₂
Calcium	14.498	0.293	8.328	20.285	CaO
Iron	12.091	0.464	4.985	15.555	FeO
Oxygen	42.175	0.447	60.694		

Peneira – ASTM80 – Material Passante

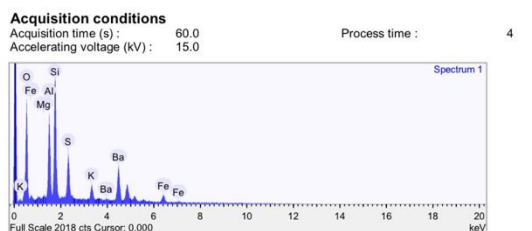
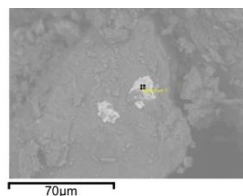
P01 – ASTM80 – Material passante



Quantification Settings
 Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

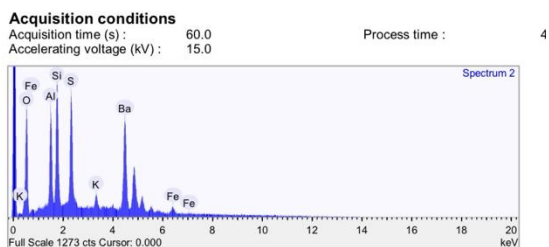
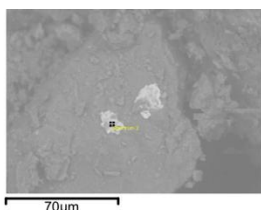
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	13.086	0.293	10.554	24.725	Al ₂ O ₃
Silicon	26.978	0.409	20.902	57.714	SiO ₂
Potassium	2.569	0.190	1.430	3.094	K ₂ O
Iron	11.245	0.531	4.382	14.467	FeO
Oxygen	46.122	0.511	62.732		



Quantification Settings
 Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

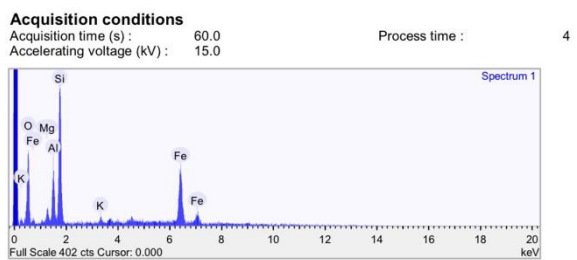
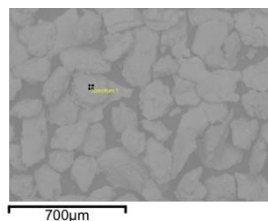
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.408	0.085	0.444	0.676	MgO
Aluminum	8.657	0.161	8.483	16.357	Al ₂ O ₃
Silicon	14.938	0.203	14.063	31.957	SiO ₂
Sulfur	5.963	0.147	4.917	14.888	SO ₃
Potassium	2.253	0.107	1.523	2.714	K ₂ O
Iron	4.456	0.237	2.110	5.732	FeO
Barium	24.788	0.390	4.772	27.675	BaO
Oxygen	38.538	0.344	63.688		



Quantification Settings
 Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	6.616	0.148	7.355	12.501	Al ₂ O ₃
Silicon	9.144	0.170	9.766	19.562	SiO ₂
Sulfur	8.595	0.167	8.040	21.460	SO ₃
Potassium	1.260	0.095	0.966	1.517	K ₂ O
Iron	1.953	0.210	1.049	2.513	FeO
Barium	38.018	0.408	8.303	42.447	BaO
Oxygen	34.414	0.344	64.520		

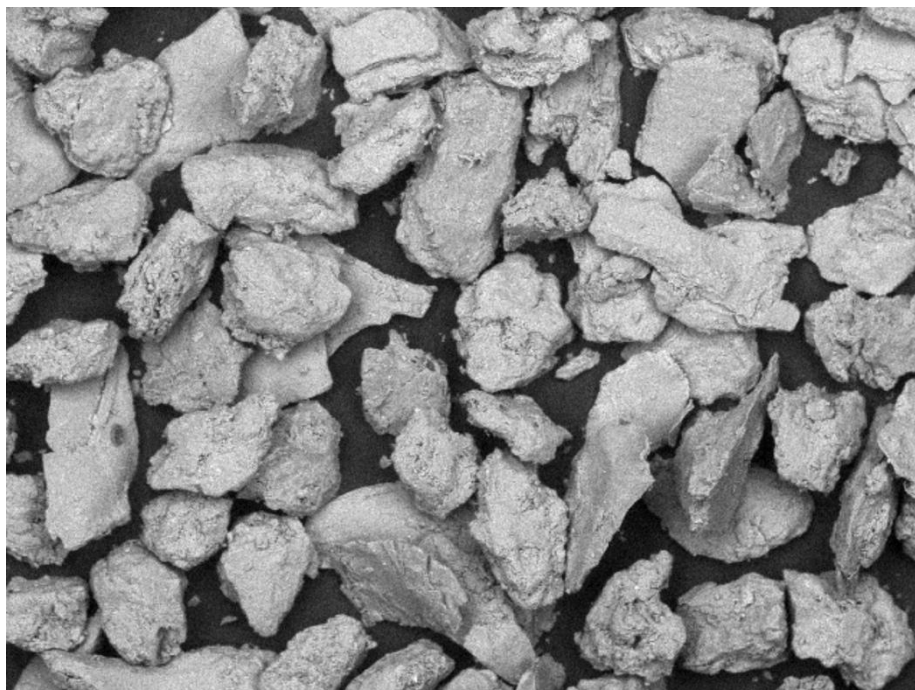


Quantification Settings
 Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element : Oxygen
 Coating element : None

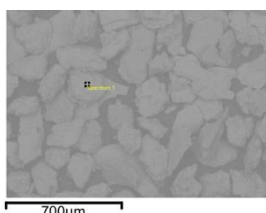
Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	1.795	0.257	1.865	2.977	MgO
Aluminum	6.380	0.344	5.972	12.054	Al ₂ O ₃
Silicon	17.996	0.517	16.184	38.499	SiO ₂
Potassium	0.941	0.195	0.608	1.134	K ₂ O
Iron	35.241	0.963	15.938	45.337	FeO
Oxygen	37.647	0.833	59.433		

P36 – ASTM80 – Material Passante

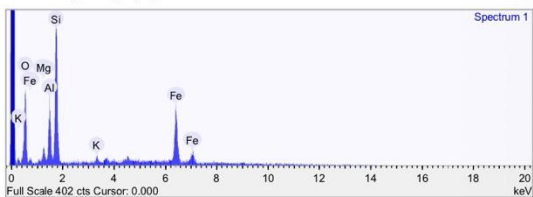


TM3000_1640 14:39 AL D8.7 x100 1 mm



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

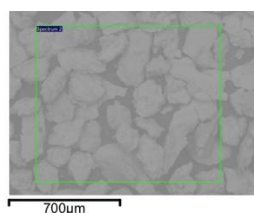


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

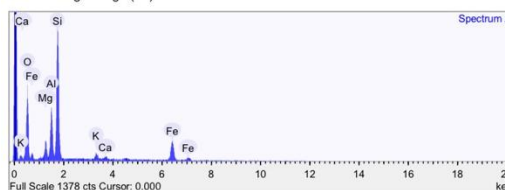
Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	1.795	0.257	1.865	2.977	MgO
Aluminum	6.380	0.344	5.972	12.054	Al ₂ O ₃
Silicon	17.996	0.517	16.184	38.499	SiO ₂
Potassium	0.941	0.195	0.608	1.134	K ₂ O
Iron	35.241	0.963	15.938	45.337	FeO
Oxygen	37.647	0.833	59.433		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 59.9 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

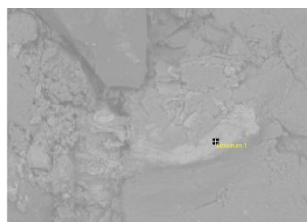


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

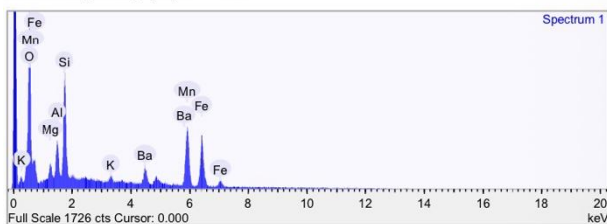
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	3.141	0.187	2.953	5.208	MgO
Aluminum	7.826	0.242	6.630	14.786	Al ₂ O ₃
Silicon	24.304	0.372	19.781	51.993	SiO ₂
Potassium	1.454	0.154	0.850	1.752	K ₂ O
Calcium	0.745	0.140	0.425	1.042	CaO
Iron	19.604	0.551	8.024	25.220	FeO
Oxygen	42.927	0.505	61.336		



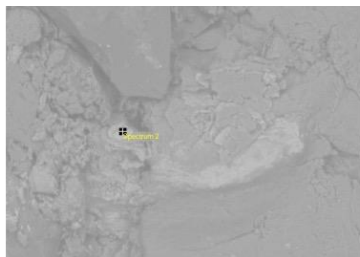
100µm

Acquisition conditionsAcquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

**Quantification Settings**Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0Combined element : Oxygen
Coating element : None**Summary results**

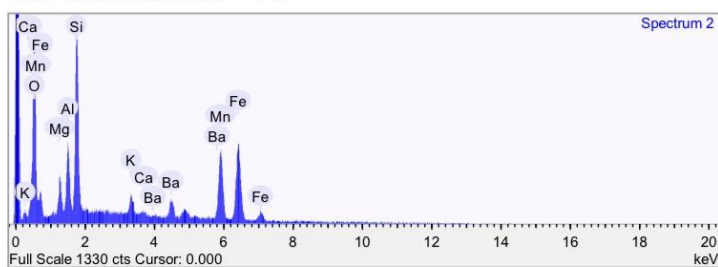
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	1.818	0.148	2.239	3.014	MgO
Aluminum	3.701	0.153	4.109	6.993	Al ₂ O ₃
Silicon	9.894	0.202	10.552	21.166	SiO ₂
Potassium	0.679	0.099	0.520	0.818	K ₂ O
Manganese	22.972	0.392	12.525	29.662	MnO
Iron	22.415	0.424	12.023	28.836	FeO
Barium	8.518	0.371	1.858	9.510	BaO
Oxygen	30.003	0.417	56.173		



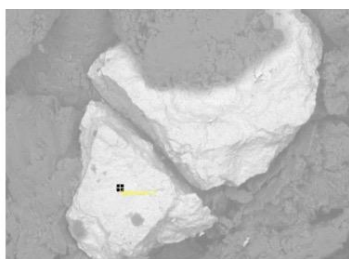
100µm

Acquisition conditionsAcquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

**Quantification Settings**Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0Combined element : Oxygen
Coating element : None**Summary results**

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	2.732	0.142	3.189	4.530	MgO
Aluminum	4.172	0.148	4.387	7.882	Al ₂ O ₃
Silicon	11.922	0.208	12.044	25.505	SiO ₂
Potassium	1.588	0.110	1.152	1.913	K ₂ O
Calcium	0.324	0.092	0.229	0.453	CaO
Manganese	17.839	0.361	9.213	23.034	MnO
Iron	22.843	0.419	11.605	29.387	FeO
Barium	6.535	0.345	1.350	7.296	BaO
Oxygen	32.046	0.407	56.831		

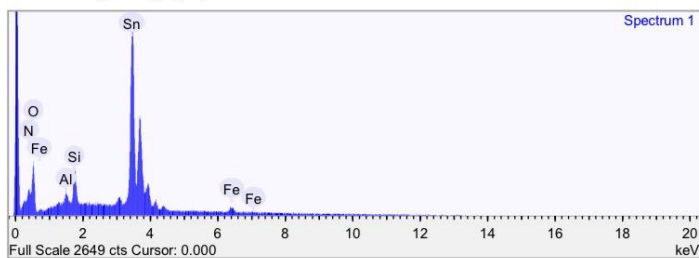


100µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

**Quantification Settings**

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Nitrogen	0.000	0.000	0.000	0.000	N2O5
Aluminum	1.016	0.105	1.649	1.919	Al2O3
Silicon	3.294	0.121	5.138	7.048	SiO2
Iron	2.413	0.225	1.892	3.104	FeO
Tin	69.258	0.392	25.560	87.930	SnO2
Oxygen	24.019	0.346	65.761		

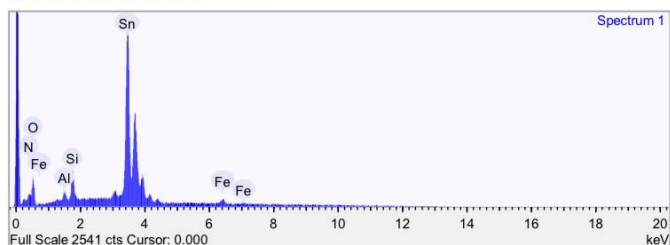


100µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

**Quantification Settings**

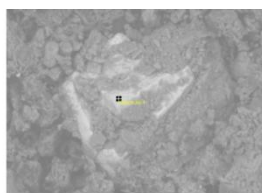
Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Nitrogen	0.000	0.000	0.000	0.000	N2O5
Aluminum	0.960	0.089	1.580	1.814	Al2O3
Silicon	2.908	0.110	4.596	6.221	SiO2
Iron	2.199	0.227	1.748	2.830	FeO
Tin	70.207	0.393	26.256	89.135	SnO2
Oxygen	23.725	0.349	65.821		

Peneira – ASTM120 – Material Passante

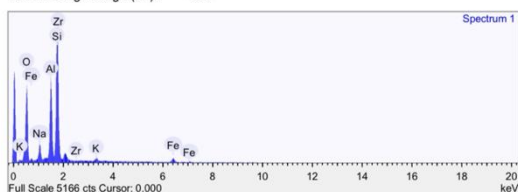
P01 – ASTM120



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

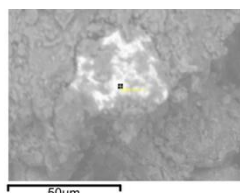


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

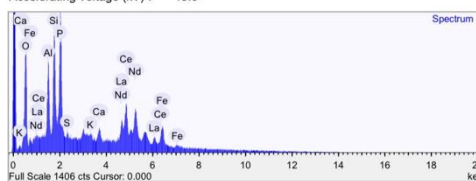
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	3.772	0.113	3.509	5.085	Na ₂ O
Aluminum	12.564	0.146	9.958	23.740	Al ₂ O ₃
Silicon	27.513	0.217	20.949	58.859	SiO ₂
Potassium	0.928	0.074	0.507	1.118	K ₂ O
Iron	4.173	0.190	1.598	5.368	FeO
Zirconium	4.317	0.276	1.012	5.831	ZrO ₂
Oxygen	46.733	0.283	62.466		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

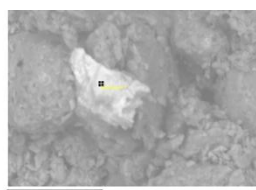


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

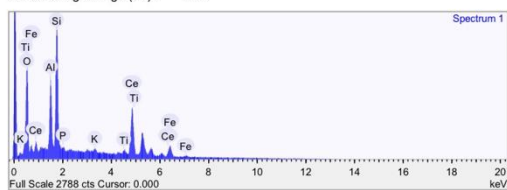
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	5.167	0.143	5.716	9.762	Al ₂ O ₃
Silicon	7.430	0.174	7.896	15.894	SiO ₂
Phosphorus	9.764	0.211	9.410	22.373	P ₂ O ₅
Sulfur	0.487	0.091	0.453	1.215	SO ₃
Potassium	0.379	0.093	0.289	0.456	K ₂ O
Calcium	1.216	0.101	0.906	1.702	CaO
Iron	6.237	0.286	3.333	8.023	FeO
Lanthanum	8.052	0.501	1.730	9.443	La ₂ O ₃
Cerium	17.704	0.558	3.771	20.736	Ce ₂ O ₃
Neodymium	8.913	0.509	1.845	10.396	Nd ₂ O ₃
Oxygen	34.653	0.524	64.651		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

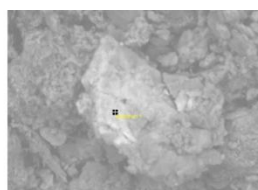


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

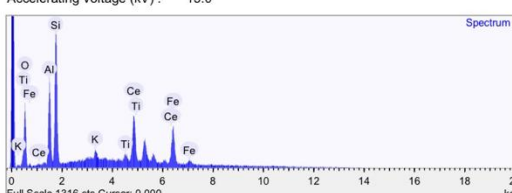
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	7.856	0.145	8.721	14.844	Al ₂ O ₃
Silicon	15.362	0.190	16.381	32.863	SiO ₂
Phosphorus	0.481	0.098	0.465	1.101	P ₂ O ₅
Potassium	0.517	0.078	0.396	0.623	K ₂ O
Titanium	0.958	0.114	0.599	1.598	TiO ₂
Iron	5.547	0.227	2.975	7.137	FeO
Cerium	35.717	0.379	7.635	41.835	Ce ₂ O ₃
Oxygen	33.562	0.327	62.829		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

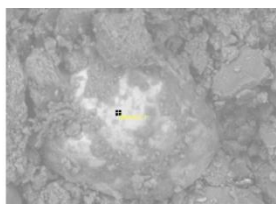


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

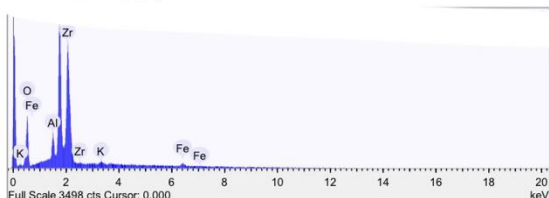
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	7.443	0.175	8.319	14.063	Al ₂ O ₃
Silicon	13.362	0.226	14.347	28.586	SiO ₂
Potassium	1.003	0.113	0.773	1.208	K ₂ O
Titanium	1.357	0.164	0.854	2.263	TiO ₂
Iron	15.722	0.398	8.490	20.226	FeO
Cerium	28.733	0.513	6.184	33.654	Ce ₂ O ₃
Oxygen	32.380	0.427	61.033		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

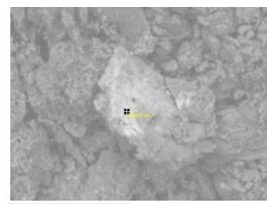


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

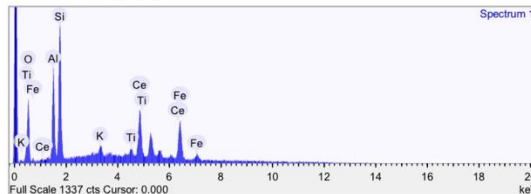
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	2.791	0.101	2.954	5.273	Al ₂ O ₃
Silicon	16.852	0.215	17.135	36.051	SiO ₂
Potassium	0.460	0.098	0.336	0.554	K ₂ O
Iron	2.274	0.223	1.163	2.926	FeO
Zirconium	40.862	0.449	12.793	55.196	ZrO ₂
Oxygen	36.761	0.398	65.619		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

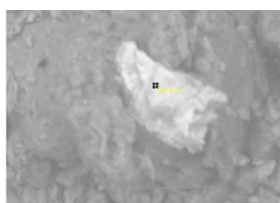


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

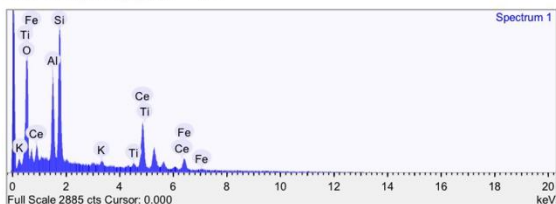
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	7.897	0.175	8.813	14.921	Al ₂ O ₃
Silicon	12.954	0.219	13.888	27.712	SiO ₂
Potassium	1.050	0.108	0.809	1.265	K ₂ O
Titanium	1.342	0.162	0.844	2.238	TiO ₂
Iron	16.083	0.389	8.672	20.691	FeO
Cerium	28.322	0.499	6.086	33.173	Ce ₂ O ₃
Oxygen	32.352	0.417	60.888		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

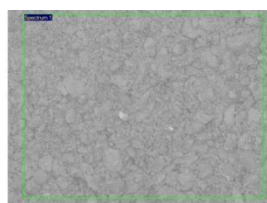


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

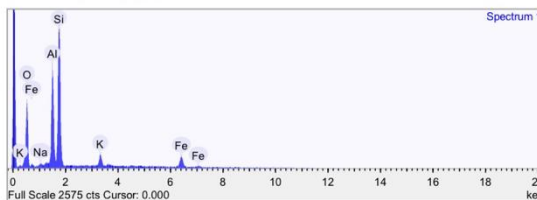
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	9.119	0.155	9.761	17.229	Al ₂ O ₃
Silicon	16.383	0.197	16.847	35.047	SiO ₂
Potassium	0.654	0.080	0.483	0.788	K ₂ O
Titanium	0.982	0.114	0.592	1.637	TiO ₂
Iron	5.613	0.229	2.903	7.221	FeO
Cerium	32.510	0.378	6.701	38.077	Ce ₂ O ₃
Oxygen	34.741	0.321	62.714		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.1
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



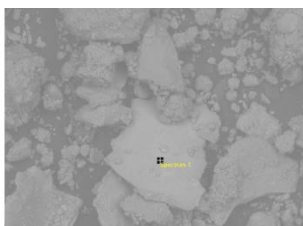
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	0.530	0.105	0.501	0.714	Na ₂ O
Aluminum	13.680	0.202	11.012	25.847	Al ₂ O ₃
Silicon	26.291	0.275	20.331	56.245	SiO ₂
Potassium	3.147	0.137	1.748	3.790	K ₂ O
Iron	10.419	0.358	4.052	13.403	FeO
Oxygen	45.934	0.349	62.357		

P26 – ASTM120

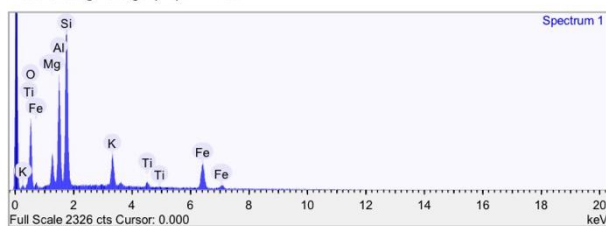


200µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

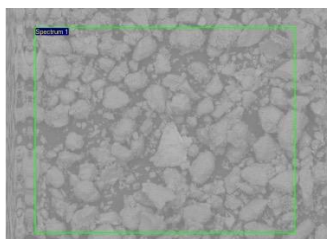
**Quantification Settings**

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0

Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	3.547	0.129	3.353	5.880	MgO
Aluminum	11.049	0.180	9.412	20.875	Al ₂ O ₃
Silicon	20.026	0.232	16.390	42.842	SiO ₂
Potassium	5.292	0.146	3.111	6.375	K ₂ O
Titanium	1.481	0.131	0.710	2.470	TiO ₂
Iron	16.757	0.352	6.897	21.558	FeO
Oxygen	41.849	0.336	60.126		

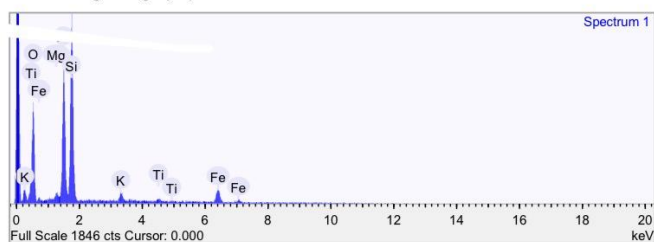


700µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 59.8
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

**Quantification Settings**

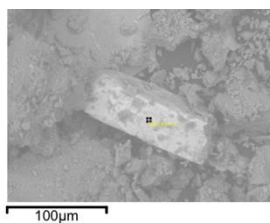
Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0

Combined element : Oxygen
 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.804	0.116	0.718	1.334	MgO
Aluminum	14.819	0.247	11.919	28.000	Al ₂ O ₃
Silicon	24.925	0.317	19.259	53.323	SiO ₂
Potassium	1.719	0.134	0.954	2.070	K ₂ O
Titanium	0.942	0.161	0.427	1.571	TiO ₂
Iron	10.652	0.408	4.139	13.703	FeO
Oxygen	46.139	0.415	62.584		

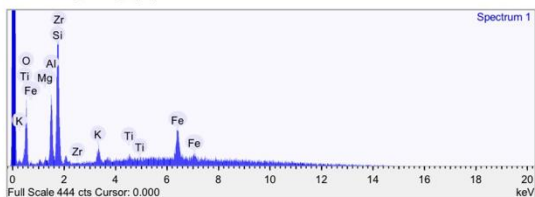
P28 – ASTM120



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



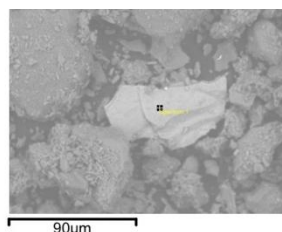
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element :

Oxygen
 None

Summary results

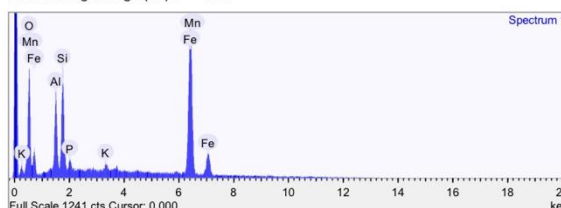
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.721	0.203	0.719	1.196	MgO
Aluminum	8.548	0.398	7.682	16.151	Al ₂ O ₃
Silicon	20.094	0.623	17.348	42.987	SiO ₂
Potassium	2.969	0.315	1.841	3.577	K ₂ O
Titanium	1.397	0.437	0.707	2.330	TiO ₂
Iron	22.931	1.171	9.957	29.501	FeO
Zirconium	3.153	0.654	0.838	4.259	ZrO ₂
Oxygen	40.186	1.026	60.907		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



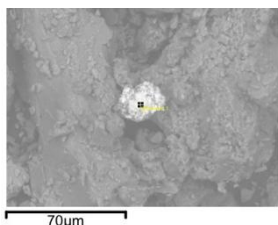
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0

Combined element :
 Coating element :
 Oxygen
 None

Summary results

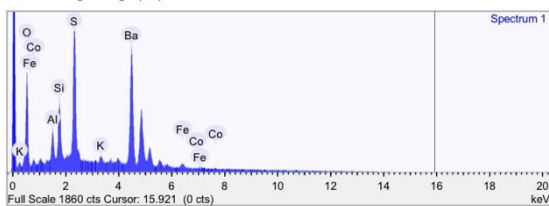
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	5.442	0.147	5.979	10.282	Al ₂ O ₃
Silicon	6.863	0.161	7.244	14.682	SiO ₂
Phosphorus	0.897	0.099	0.858	2.055	P ₂ O ₅
Potassium	0.569	0.086	0.431	0.685	K ₂ O
Manganese	0.726	0.175	0.392	0.938	MnO
Iron	55.468	0.419	29.443	71.358	FeO
Oxygen	30.035	0.379	55.653		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



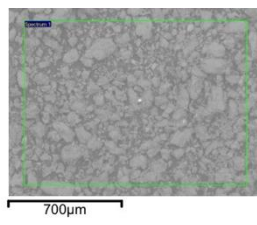
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element :

Oxygen
 None

Summary results

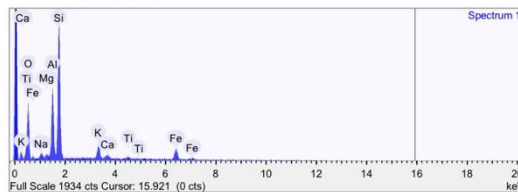
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	2.383	0.101	3.077	4.503	Al ₂ O ₃
Silicon	4.106	0.119	5.092	8.783	SiO ₂
Sulfur	11.259	0.168	12.231	28.112	SO ₃
Potassium	0.636	0.078	0.567	0.766	K ₂ O
Iron	1.478	0.186	0.922	1.901	FeO
Cobalt	0.008	0.193	0.005	0.010	CoO
Barium	50.089	0.373	12.704	55.924	BaO
Oxygen	30.041	0.315	65.404		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.2
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



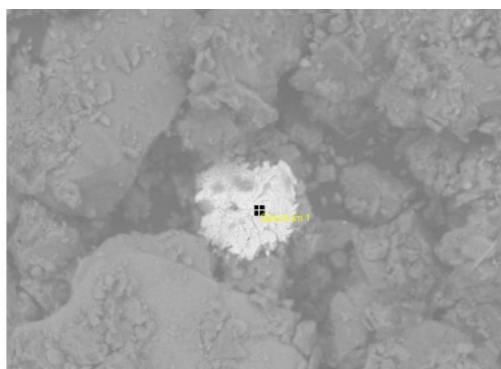
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0

Combined element :
 Coating element :
 Oxygen
 None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	1.129	0.151	1.083	1.522	Na ₂ O
Magnesium	0.518	0.115	0.470	0.860	MgO
Aluminum	10.689	0.223	8.738	20.196	Al ₂ O ₃
Silicon	26.023	0.329	20.438	55.671	SiO ₂
Potassium	3.782	0.173	2.133	4.555	K ₂ O
Calcium	1.035	0.139	0.569	1.448	CaO
Titanium	0.746	0.168	0.343	1.244	TiO ₂
Iron	11.275	0.434	4.453	14.505	FeO
Oxygen	44.804	0.437	61.771		

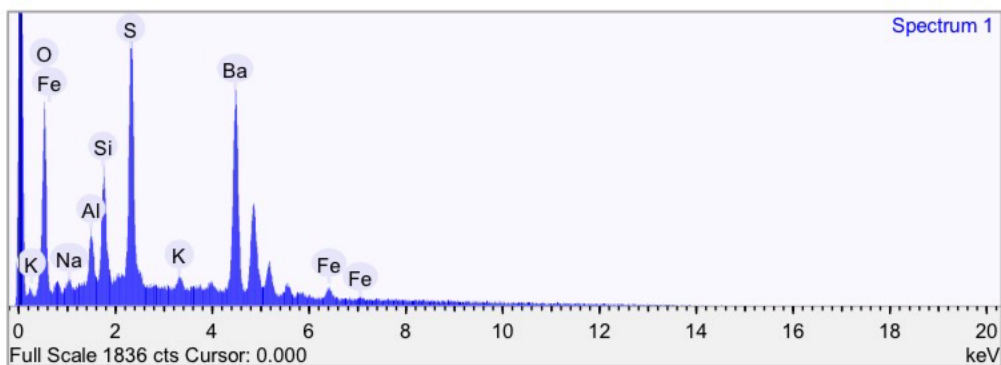


70µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



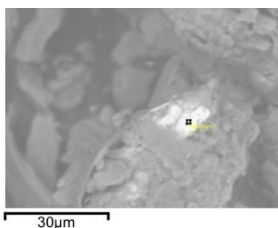
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	0.469	0.110	0.692	0.632	Na ₂ O
Aluminum	2.211	0.104	2.781	4.178	Al ₂ O ₃
Silicon	4.340	0.124	5.243	9.283	SiO ₂
Sulfur	11.595	0.172	12.272	28.951	SO ₃
Potassium	0.676	0.080	0.586	0.814	K ₂ O
Iron	2.264	0.192	1.376	2.913	FeO
Barium	47.675	0.368	11.780	53.229	BaO
Oxygen	30.771	0.313	65.269		

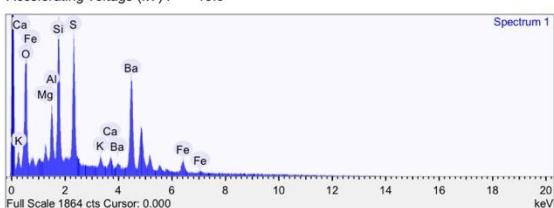
P34 – ASTM120



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



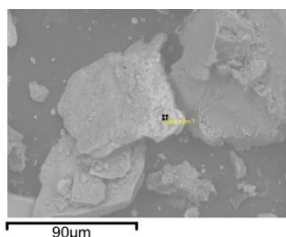
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0
Combined element :
Coating element :

Oxygen
None

Summary results

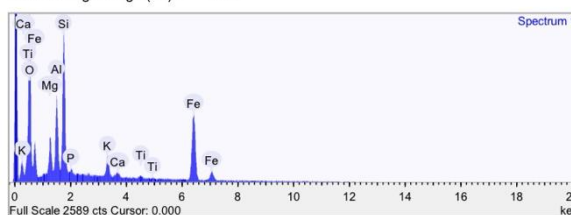
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	1.314	0.096	1.630	2.178	MgO
Aluminum	3.532	0.109	3.949	6.674	Al ₂ O ₃
Silicon	9.312	0.143	10.002	19.920	SiO ₂
Sulfur	9.014	0.144	8.481	22.507	SO ₃
Potassium	0.872	0.075	0.673	1.050	K ₂ O
Calcium	1.027	0.079	0.773	1.437	CaO
Iron	3.820	0.198	2.064	4.914	FeO
Barium	37.008	0.343	8.129	41.319	BaO
Oxygen	34.102	0.296	64.301		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



Quantification Settings

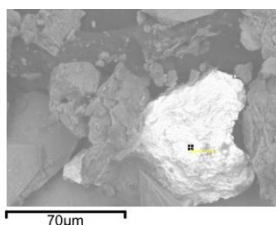
Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0

Combined element :
Coating element :

Oxygen
None

Summary results

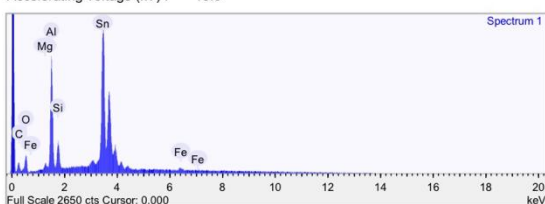
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	4.086	0.129	4.297	6.775	MgO
Aluminum	6.848	0.140	6.489	12.939	Al ₂ O ₃
Silicon	13.606	0.176	12.385	29.108	SiO ₂
Phosphorus	0.662	0.094	0.546	1.516	P ₂ O ₅
Potassium	2.782	0.100	1.819	3.351	K ₂ O
Calcium	0.641	0.080	0.409	0.896	CaO
Titanium	0.604	0.096	0.323	1.008	TiO ₂
Iron	34.518	0.338	15.802	44.407	FeO
Oxygen	36.253	0.313	57.931		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



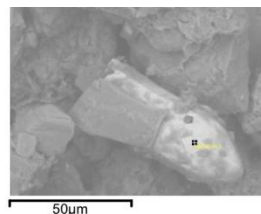
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0
Combined element :
Coating element :

Oxygen
None

Summary results

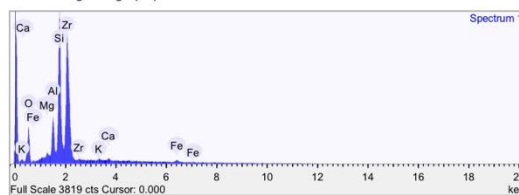
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Carbon	3.335	0.254	8.518	12.221	CO ₂
Magnesium	0.514	0.063	0.648	0.852	MgO
Aluminum	9.041	0.132	10.279	17.082	Al ₂ O ₃
Silicon	2.280	0.079	2.490	4.877	SiO ₂
Iron	0.981	0.157	0.539	1.261	FeO
Tin	50.179	0.392	12.969	63.707	SnO ₂
Oxygen	33.671	0.398	64.558		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0

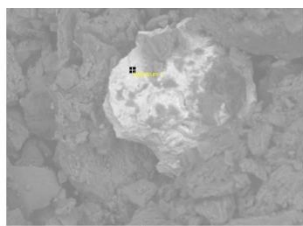
Combined element :
Coating element :

Oxygen
None

Summary results

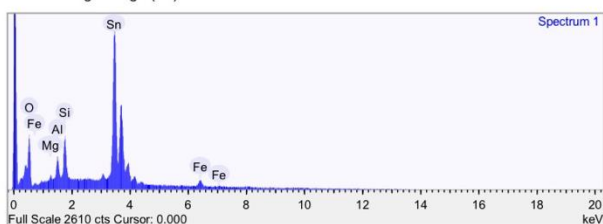
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.512	0.068	0.601	0.849	MgO
Aluminum	4.068	0.097	4.305	7.687	Al ₂ O ₃
Silicon	15.344	0.179	15.596	32.824	SiO ₂
Potassium	0.300	0.074	0.219	0.351	K ₂ O
Calcium	0.489	0.077	0.349	0.685	CaO
Iron	1.474	0.166	0.754	1.897	FeO
Zirconium	41.233	0.387	12.905	55.697	ZrO ₂
Oxygen	36.579	0.344	65.272		

P36 – ASTM120



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

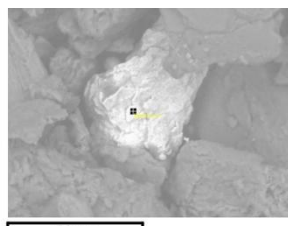


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

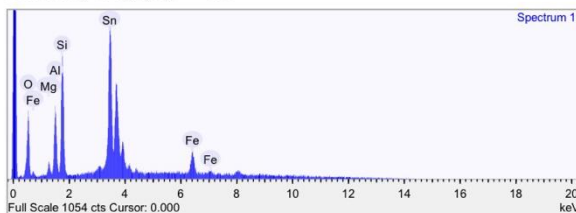
Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.566	0.108	0.952	0.938	MgO
Aluminum	2.174	0.113	3.297	4.108	Al ₂ O ₃
Silicon	4.263	0.127	6.210	9.119	SiO ₂
Iron	3.127	0.228	2.291	4.023	FeO
Tin	64.440	0.390	22.214	81.812	SnO ₂
Oxygen	25.431	0.343	65.036		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

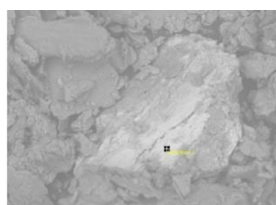


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

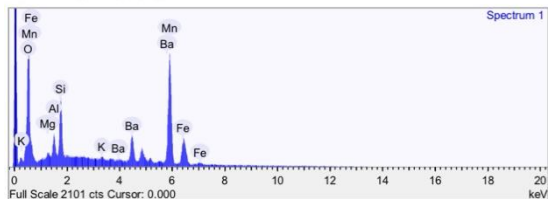
Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	1.185	0.106	1.633	1.965	MgO
Aluminum	4.833	0.156	6.001	9.132	Al ₂ O ₃
Silicon	9.131	0.196	10.892	19.534	SiO ₂
Iron	8.160	0.388	4.895	10.498	FeO
Tin	46.371	0.510	13.089	58.872	SnO ₂
Oxygen	30.320	0.445	63.490		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

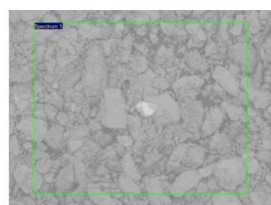


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

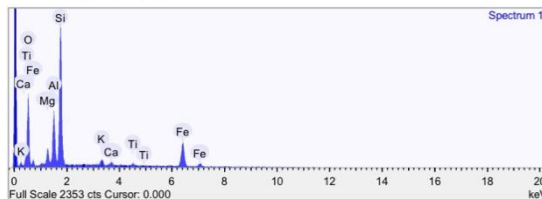
Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.652	0.113	0.908	1.082	MgO
Aluminum	2.222	0.118	2.788	4.198	Al ₂ O ₃
Silicon	5.852	0.143	7.055	12.520	SiO ₂
Potassium	0.323	0.080	0.280	0.389	K ₂ O
Manganese	42.317	0.406	26.081	54.641	MnO
Iron	8.483	0.316	5.143	10.914	FeO
Barium	14.561	0.353	3.590	16.257	BaO
Oxygen	25.589	0.357	54.155		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.2 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0



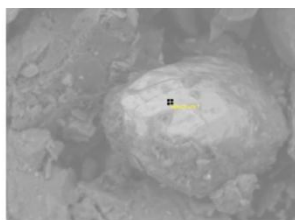
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	2.585	0.133	2.464	4.285	MgO
Aluminum	7.313	0.175	6.283	13.817	Al ₂ O ₃
Silicon	23.612	0.275	19.489	50.513	SiO ₂
Potassium	1.328	0.109	0.788	1.600	K ₂ O
Calcium	0.750	0.104	0.434	1.049	CaO
Titanium	0.813	0.134	0.394	1.356	TiO ₂
Iron	21.282	0.415	8.834	27.379	FeO
Oxygen	42.317	0.384	61.315		

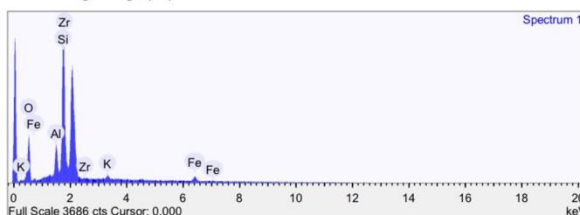
P37 – ASTM120



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time :

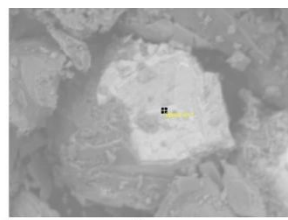


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element :

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	3.308	0.098	3.457	6.250	Al ₂ O ₃
Silicon	17.065	0.203	17.134	36.508	SiO ₂
Potassium	0.805	0.091	0.581	0.970	K ₂ O
Iron	3.542	0.212	1.788	4.557	FeO
Zirconium	38.286	0.421	11.836	51.716	ZrO ₂
Oxygen	36.994	0.370	65.204		

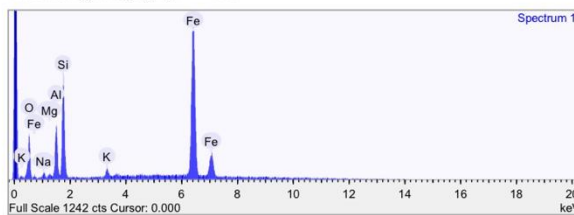


Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time :

4

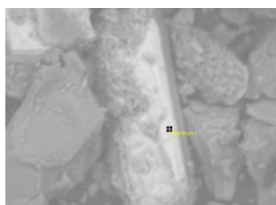


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element : Oxygen
 None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	0.671	0.106	0.881	0.905	Na ₂ O
Magnesium	0.271	0.073	0.336	0.449	MgO
Aluminum	3.879	0.125	4.338	7.329	Al ₂ O ₃
Silicon	7.256	0.152	7.796	15.523	SiO ₂
Potassium	0.741	0.068	0.572	0.892	K ₂ O
Iron	58.222	0.406	31.458	74.901	FeO
Oxygen	28.960	0.371	54.619		

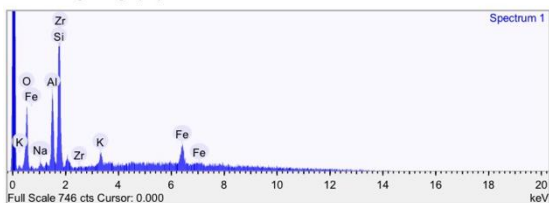


Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time :

4



Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element : Oxygen
 None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	1.440	0.230	1.454	1.941	Na ₂ O
Aluminum	9.963	0.343	8.574	18.825	Al ₂ O ₃
Silicon	23.136	0.545	19.128	49.496	SiO ₂
Potassium	2.618	0.290	1.555	3.154	K ₂ O
Iron	15.706	0.947	6.530	20.206	FeO
Zirconium	4.723	0.666	1.202	6.379	ZrO ₂
Oxygen	42.413	0.834	61.556		



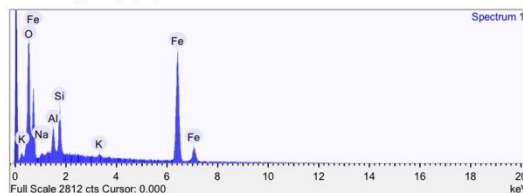
200µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time :

4

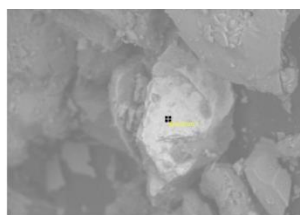


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element : Oxygen
 None

Summary results

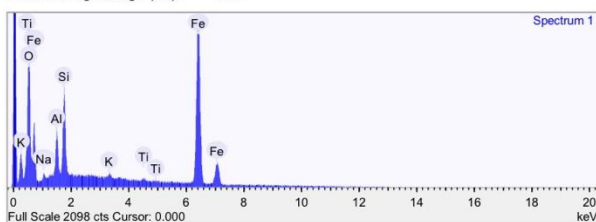
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	0.775	0.157	1.055	1.044	Na ₂ O
Aluminum	3.197	0.122	3.708	6.040	Al ₂ O ₃
Silicon	5.501	0.133	6.130	11.769	SiO ₂
Potassium	0.420	0.077	0.336	0.506	K ₂ O
Iron	62.683	0.352	35.127	80.640	FeO
Oxygen	27.424	0.318	53.644		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time :



Quantification Settings

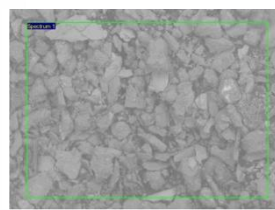
Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0

Combined element :
Coating element :

Oxygen
None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	0.864	0.128	1.162	1.165	Na ₂ O
Aluminum	3.250	0.109	3.723	6.140	Al ₂ O ₃
Silicon	6.112	0.127	6.727	13.076	SiO ₂
Potassium	0.385	0.071	0.304	0.463	K ₂ O
Titanium	0.406	0.088	0.262	0.678	TiO ₂
Iron	61.002	0.335	33.763	78.478	FeO
Oxygen	27.981	0.304	54.059		

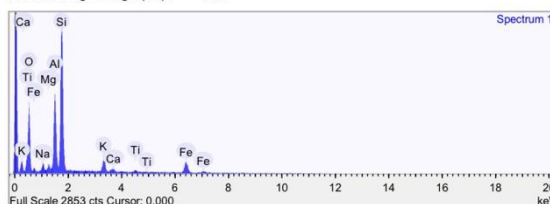


4 Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.2
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time :

4



Quantification Settings

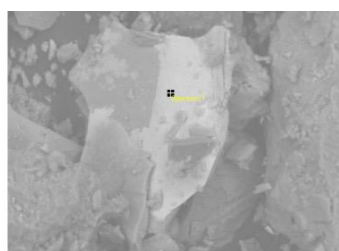
Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0

Combined element :
Coating element :

Oxygen
None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	1.495	0.125	1.423	2.015	Na ₂ O
Magnesium	0.953	0.099	0.858	1.580	MgO
Aluminum	10.873	0.183	8.818	20.543	Al ₂ O ₃
Silicon	26.253	0.268	20.454	56.162	SiO ₂
Potassium	3.523	0.132	1.972	4.244	K ₂ O
Calcium	0.579	0.101	0.316	0.811	CaO
Titanium	0.658	0.126	0.301	1.097	TiO ₂
Iron	10.531	0.341	4.126	13.547	FeO
Oxygen	45.136	0.350	61.733		



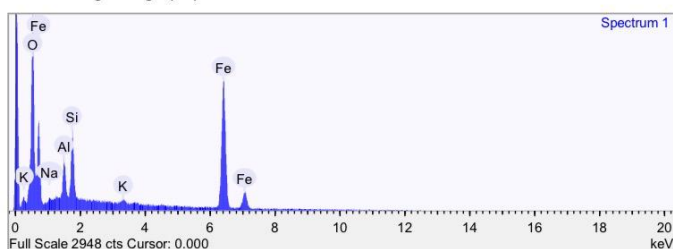
60µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time :

4



Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
Number of anions : 10.0

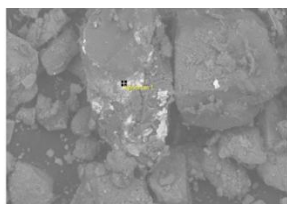
Combined element :
Coating element :

Oxygen
None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	0.712	0.159	0.948	0.959	Na ₂ O
Aluminum	3.885	0.127	4.409	7.340	Al ₂ O ₃
Silicon	6.446	0.141	7.027	13.789	SiO ₂
Potassium	0.430	0.078	0.337	0.518	K ₂ O
Iron	60.159	0.354	32.985	77.393	FeO
Oxygen	28.369	0.320	54.295		

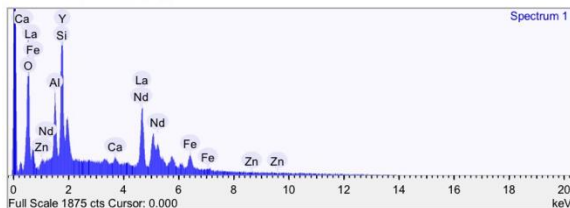
P39 – ASTM120



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

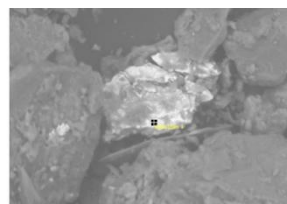


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element :

Summary results

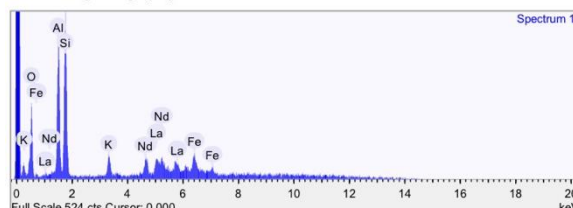
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	4.851	0.142	6.210	9.165	Al ₂ O ₃
Silicon	11.738	0.210	14.436	25.111	SiO ₂
Calcium	0.666	0.095	0.574	0.932	CaO
Iron	5.134	0.268	3.175	6.604	FeO
Zinc	1.170	0.349	0.618	1.457	ZnO
Yttrium	8.615	0.410	3.347	10.940	Y ₂ O ₃
Lanthanum	28.416	0.471	7.066	33.325	La ₂ O ₃
Neodymium	10.687	0.475	2.559	12.465	Nd ₂ O ₃
Oxygen	28.723	0.462	62.014		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

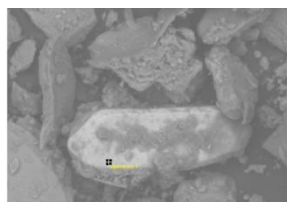


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element :
 Oxygen : None

Summary results

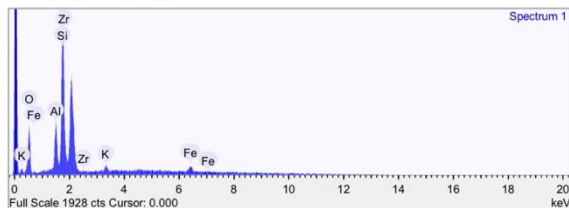
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	12.420	0.395	12.409	23.467	Al ₂ O ₃
Silicon	16.174	0.468	15.524	34.601	SiO ₂
Potassium	2.649	0.205	1.826	3.191	K ₂ O
Iron	8.784	0.734	4.240	11.301	FeO
Lanthanum	12.674	0.817	2.460	14.864	La ₂ O ₃
Neodymium	10.782	1.054	2.015	12.576	Nd ₂ O ₃
Oxygen	36.516	0.872	61.526		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

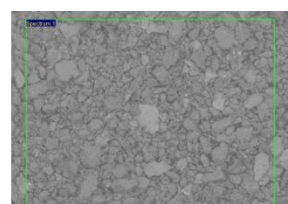


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element :
 Oxygen : None

Summary results

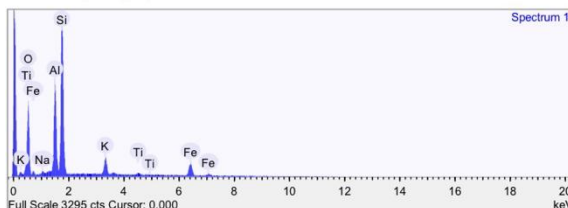
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	5.120	0.156	5.143	9.675	Al ₂ O ₃
Silicon	18.008	0.295	17.377	38.524	SiO ₂
Potassium	1.332	0.136	0.923	1.604	K ₂ O
Iron	4.144	0.373	2.011	5.331	FeO
Zirconium	33.215	0.592	9.868	44.866	ZrO ₂
Oxygen	38.181	0.521	64.678		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.1
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

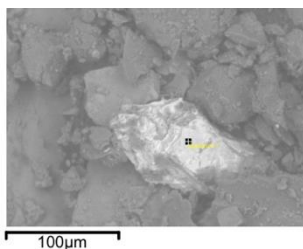


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0
 Combined element :
 Coating element :
 Oxygen : None

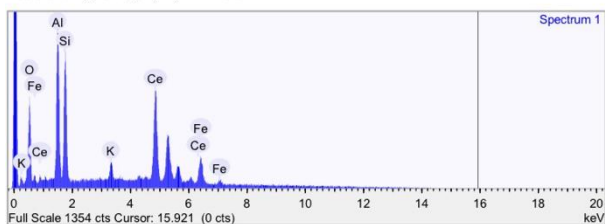
Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Sodium	0.585	0.096	0.561	0.788	Na ₂ O
Aluminum	12.069	0.171	9.866	22.804	Al ₂ O ₃
Silicon	25.797	0.240	20.258	55.188	SiO ₂
Potassium	4.101	0.129	2.313	4.939	K ₂ O
Titanium	0.711	0.117	0.327	1.186	TiO ₂
Iron	11.733	0.315	4.634	15.095	FeO
Oxygen	45.004	0.313	62.041		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

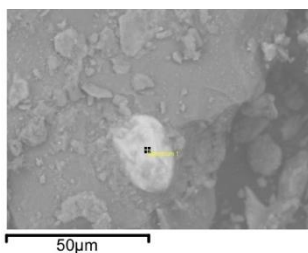


Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

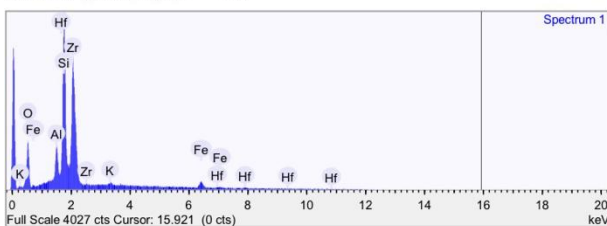
Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	11.287	0.190	13.634	21.326	Al ₂ O ₃
Silicon	9.033	0.174	10.482	19.324	SiO ₂
Potassium	1.463	0.092	1.219	1.762	K ₂ O
Iron	7.660	0.290	4.470	9.855	FeO
Cerium	40.753	0.439	9.479	47.733	Ce ₂ O ₃
Oxygen	29.804	0.359	60.715		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0 Process time : 4
 Accelerating voltage (kV) : 15.0



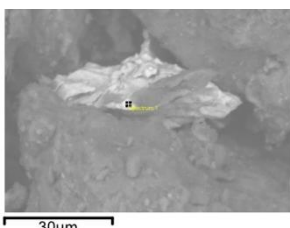
Quantification Settings

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	3.344	0.101	3.508	6.318	Al ₂ O ₃
Silicon	16.924	0.231	17.057	36.205	SiO ₂
Potassium	0.507	0.087	0.367	0.611	K ₂ O
Iron	4.153	0.217	2.105	5.343	FeO
Zirconium	37.593	0.469	11.666	50.780	ZrO ₂
Hafnium	0.630	0.514	0.100	0.743	HfO ₂
Oxygen	36.849	0.439	65.197		

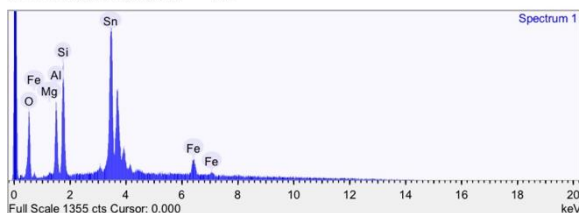
P42 – ASTM120



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



Quantification Settings

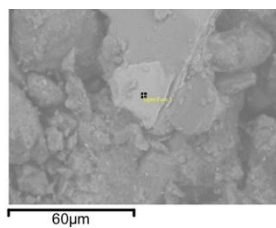
Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0

Combined element :
 Coating element :

Oxygen
 None

Summary results

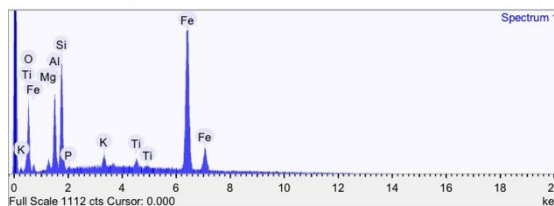
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.324	0.081	0.455	0.537	MgO
Aluminum	5.579	0.146	7.054	10.541	Al ₂ O ₃
Silicon	8.530	0.172	10.361	18.248	SiO ₂
Iron	6.823	0.331	4.168	8.777	FeO
Tin	48.754	0.457	14.013	61.897	SnO ₂
Oxygen	29.991	0.399	63.950		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



Quantification Settings

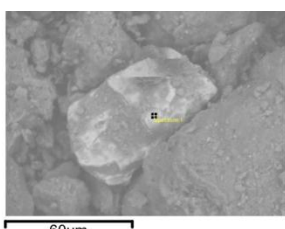
Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0

Combined element :
 Coating element :

Oxygen
 None

Summary results

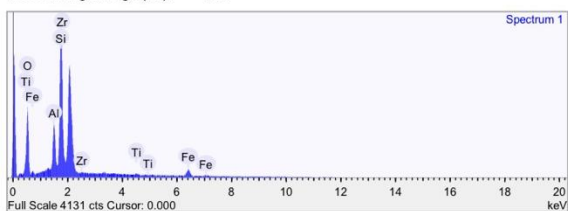
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.852	0.095	1.024	1.412	MgO
Aluminum	5.178	0.145	5.612	9.784	Al ₂ O ₃
Silicon	7.651	0.165	7.966	16.368	SiO ₂
Phosphorus	0.256	0.071	0.242	0.587	P ₂ O ₅
Potassium	1.015	0.093	0.759	1.222	K ₂ O
Titanium	1.164	0.129	0.711	1.942	TiO ₂
Iron	53.389	0.427	27.954	68.684	FeO
Oxygen	30.494	0.387	55.733		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



Quantification Settings

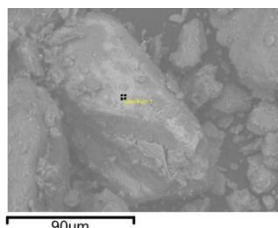
Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0

Combined element :
 Coating element :

Oxygen
 None

Summary results

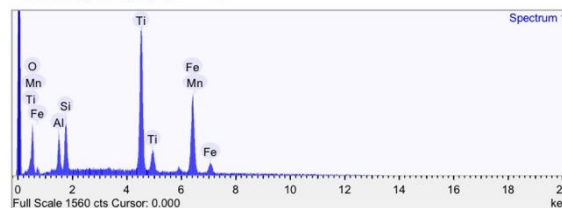
Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	4.807	0.104	4.948	9.082	Al ₂ O ₃
Silicon	16.579	0.187	16.397	35.467	SiO ₂
Titanium	0.524	0.093	0.304	0.874	TiO ₂
Iron	4.956	0.203	2.465	6.376	FeO
Zirconium	35.684	0.391	10.866	48.201	ZrO ₂
Oxygen	37.450	0.343	65.020		



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4



Quantification Settings

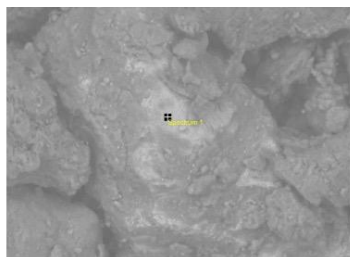
Quantification method : Stoichiometry (normalised)
 Number of anions : 10.0

Combined element :
 Coating element :

Oxygen
 None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Aluminum	2.751	0.100	2.903	5.197	Al ₂ O ₃
Silicon	3.861	0.111	3.915	8.260	SiO ₂
Titanium	26.829	0.290	15.950	44.752	TiO ₂
Manganese	1.430	0.180	0.741	1.846	MnO
Iron	31.050	0.379	15.833	39.945	FeO
Oxygen	34.079	0.342	60.658		

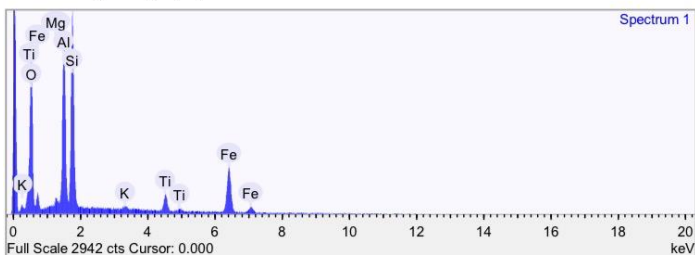


70µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.0
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

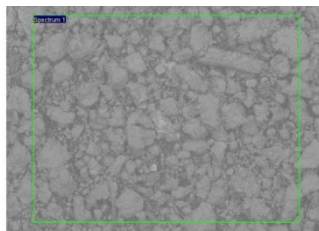
Process time : 4

**Quantification Settings**

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.630	0.083	0.607	1.044	MgO
Aluminum	14.220	0.166	12.358	26.868	Al ₂ O ₃
Silicon	17.517	0.188	14.625	37.475	SiO ₂
Potassium	0.388	0.069	0.233	0.467	K ₂ O
Titanium	3.620	0.127	1.772	6.038	TiO ₂
Iron	21.849	0.306	9.174	28.108	FeO
Oxygen	41.776	0.287	61.230		

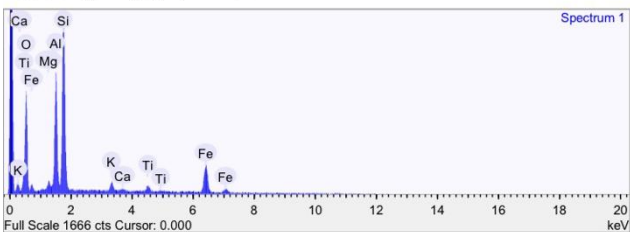


700µm

Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 60.1
 Accelerating voltage (kV) : 15.0

Process time : 4

**Quantification Settings**

Quantification method : Stoichiometry (normalised) Combined element : Oxygen
 Number of anions : 10.0 Coating element : None

Summary results

Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	0.826	0.120	0.778	1.369	MgO
Aluminum	11.921	0.228	10.123	22.524	Al ₂ O ₃
Silicon	21.856	0.300	17.829	46.756	SiO ₂
Potassium	1.580	0.127	0.926	1.903	K ₂ O
Calcium	0.413	0.111	0.236	0.578	CaO
Titanium	1.758	0.169	0.841	2.932	TiO ₂
Iron	18.608	0.456	7.634	23.939	FeO
Oxygen	43.039	0.428	61.634		