



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Guilherme Rodrigues Lima de Oliveira

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E COMPOSIÇÃO DE ESPODUMÊNIO
CONTENDO ALTO TEOR DE Li - PROVENIENTE DE ARAÇUAÍ/MG

MONOGRAFIA nº 596

OURO PRETO

2026

Guilherme Rodrigues Lima de Oliveira

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E COMPOSIÇÃO DE ESPODUMÊNIO
CONTENDO ALTO TEOR DE Li - PROVENIENTE DE ARAÇUAÍ/MG

Monografia do Projeto Final de Curso
apresentado ao Departamento de Geologia da
Escola de Minas da Universidade Federal de
Ouro Preto como requisito para avaliação da
disciplina Projeto Final de Curso II – GEO144.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Barbosa de
Andrade

Coorientador: Dr. Eduardo Duarte Marques

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O482c Oliveira, Guilherme Rodrigues Lima de.
Caracterização estrutural e composição de espodumênio contendo alto teor de Li - proveniente de Araçuaí/MG. [manuscrito] / Guilherme Rodrigues Lima de Oliveira. - 2026.
72 f.: il.: , gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Barbosa de Andrade.

Coorientador: Dr. Eduardo Duarte Marques.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Química mineralógica. 2. Lítio. 3. Pegmatitos. 4. Raios X - Difração. I. Andrade, Marcelo Barbosa de. II. Marques, Eduardo Duarte. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 552.322

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Rodrigues Lima de Oliveira

Caracterização estrutural e composição de espodumênio contendo alto teor de Li - proveniente de Araçuaí/MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 21 de julho de 2026

Membros da banca

Dr. Marcelo Barbosa de Andrade - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Flávia Compassi da Costa - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Sarah Andresa Bonfim - Universidade Federal de Minas Gerais

Marcelo Barbosa de Andrade, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Barbosa de Andrade, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/07/2026, às 00:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1146523** e o código CRC **E864A394**.

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso aprofunda a caracterização de pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Araçuaí/MG), com ênfase no espodumênio, mineral estratégico para a obtenção de lítio (Li). O lítio tem se tornado cada vez mais relevante no contexto da transição energética global, sendo fundamental para a produção de baterias de íons de lítio utilizadas em veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia renovável. A amostra foi fornecida pela Companhia Brasileira do Lítio em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). O objetivo central foi refinar a análise mineralógica e determinar a composição química da amostra e seu teor de lítio, integrando dados de Difração de Raios X com Refinamento *Rietveld*, Espectroscopia *Raman* e análise geoquímica por *ICP-OES* e *ICP-MS*. Os teores equivalentes calculados para os principais óxidos foram de 17,28 wt% para o Al_2O_3 , 1,39 wt% para Fe_2O_3 e 3,21 wt% de Li_2O . O teor de 3,21% de Li_2O equivalente confirma a presença significativa de lítio na alíquota analisada. A mineralogia e parte da assinatura elementar são compatíveis com características de pegmatitos da família LCT, embora essa interpretação deva ser considerada preliminar. A análise de DRX, alinhada ao refinamento *Rietveld*, confirmou e quantificou a presença de quatro fases cristalinas, sendo elas o quartzo (4,53%), albita (33,39%), espodumênio (60,19%) e a muscovita (1,88%), em que o refinamento atrelado ao difratograma experimental e aos modelos cristalográficos resultou em um *GOF* de 1,47. As quatro fases foram adicionalmente identificadas em grãos selecionados por espectroscopia *Raman*.

Palavras-chave: espodumênio; lítio; pegmatito; Difração de Raios X; *ICP*.

ABSTRACT

This Undergraduate Thesis provides an in-depth characterization of pegmatites from the Eastern Brazilian Pegmatitic Province (Araçuaí/MG), focusing on spodumene, a strategic mineral for lithium (Li) extraction. Lithium has become increasingly relevant in the context of the global energy transition, as it is essential for the production of lithium-ion batteries used in electric vehicles and renewable energy storage systems. The sample was provided by the Companhia Brasileira do Lítio (CBL) in partnership with the Geological Survey of Brazil (SGB/CPRM). The main objective was to refine the mineralogical analysis and determine the chemical composition and lithium content of the sample, integrating X-ray Diffraction (XRD) with Rietveld refinement, Raman Spectroscopy, and geochemical analysis via ICP-OES and ICP-MS. The calculated equivalent grades for the main oxides were 17.28 wt% for Al_2O_3 , 1.39 wt% for Fe_2O_3 , and 3.21 wt% for Li_2O . The 3.21% Li_2O equivalent content confirms a significant presence of lithium in the analyzed aliquot. The mineralogy and part of the elemental signature are consistent with LCT-family pegmatite characteristics, although this interpretation should be considered preliminary. The XRD analysis, aligned with Rietveld refinement, confirmed and quantified four crystalline phases: quartz (4.53%), albite (33.39%), spodumene (60.19%), and muscovite (1.88%). The refinement, linked to the experimental diffractogram and crystallographic models, resulted in a GOF of 1.47. These four phases were further identified in selected grains using Raman spectroscopy.

Keywords: spodumene; lithium; pegmatite; X-Ray Diffraction; *ICP*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostra de pegmatito proveniente da Mina da Cachoeira, Araçuaí, Minas Gerais, contendo cristais de espodumênio, quartzo e feldspato. O paquímetro foi utilizado como escala.	14
Figura 2 - Mapa de Localização e Acesso.....	17
Figura 3 - Mapa tectônico esquemático do Orógeno Araçuaí enfatizando os seus compartimentos e grandes zonas de cisalhamento. Serra do Espinhaço Meridional; CA: Zona de Cisalhamento da Chapada Acauã; S: Zona de dobramentos de Salinas; MN: Corredor transpressivo d de Minas Novas; RP: Saliência do Rio Pardo e zona de interação com o Aulacógeno do Paramirim; BG: Bloco de Guanhões; DS: Zona de Cisalhamento de Dom Silvério; I: Zona de Cisalhamento de Itapebi; AC: Zona de Cisalhamento de Abre Campo; M: Zona de Cisalhamento de Manhuaçu; G: Zona de Cisalhamento de Guacuí; B: Zona de Cisalhamento de Batatal.	25
Figura 4 - Esquema representativo da evolução do Orógeno Araçuaí. A) Abertura da Bacia Macaúbas por rifteamento, há cerca de 800Ma. B) Colisões provocam o fechamento da Bacia Macaúbas, por volta de 600Ma. C) Desenvolvimento do orógeno, há 570 Ma. D) Escape do orógeno para sul, 500 Ma.	26
Figura 5 - Coluna estratigráfica do Supergrupo Espinhaço.....	27
Figura 6 - Coluna estratigráfica do Grupo Macaúbas e do Cinturão West-Congo.	28
Figura 7 - Mapa da geologia regional da área de estudo na escala 1:650.000.	30
Figura 9 - Mapa Geológico da Folha Araçuaí/MG - SE.23-X-BVI.	32
Figura 9 - Gráfico de comparação multielementar ETR - Antes da Normalização.	44
Figura 10 - Padrão de elementos de terras raras (ETR) da amostra ESP-01 (Pegmatito CBL) normalizado pelo condrito C1 de Boynton (1984). Asterisco (*) indica elementos com concentração abaixo do limite de detecção analítico, representados pelo valor LD/2 (Censurado).	46
Figura 11 - Gráfico Multielementar - Elementos Traços	48
Figura 12 - Gráfico de razão multielementar	50
Figura 13 - Primeiro difratograma de raios X da amostra . A) Espodumênio; B) Quartzo; C) Albita;sD) Muscovita.	53
Figura 14 - Segundo difratograma de raios X da amostra . A) Espodumênio; B) Quartzo; C) Albita;sD) Muscovita.	54

Figura 15 - Refinamento Rietveld. A e B) Refinamento realizado na primeira amostragem, respectivamente, nos <i>softwares GSAS-II e TOPAS</i> . C e D) Refinamento realizado na segunda amostragem, respectivamente, nos <i>softwares GSAS-II e TOPAS</i>	55
Figura 16 - A) Registro fotográfico em escala do espodumênio. B) Espectro Raman do espodumênio. C) Sistema cristalino e célula unitária do mineral.....	58
Figura 17 - A) Registro fotográfico em escala do quartzo. B) Espectro Raman do quartzo. C) Sistema cristalino e célula unitária do mineral.	59
Figura 18 - A) Registro fotográfico em escala da muscovita. B) Espectro Raman da muscovita. C) Sistema cristalino e célula unitária do mineral.	60
Figura 19 - A) Registro fotográfico em escala da albita. B) Espectro Raman da albita. C) Sistema cristalino e célula unitária do mineral; D) Espectro Raman do microclínio.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicação das três formas comerciais do lítio e suas aplicações.....	13
Tabela 2 - Os principais minerais de lítio	14
Tabela 3 - Minerais associados a amostra de pegmatito.....	16
Tabela 4 - Classificações comparativas de pegmatitos.....	35
Tabela 5 - Sistema familiar de classificação petrogenética de pegmatitos graníticos	36
Tabela 6 - Mineralogia de acordo com o zoneamento interno e a classificação dos pegmatitos estudados (GV: Governador Valadares AR: Araçuaí)	37
Tabela 7 - Dados Brutos dos Elementos obtidos por <i>ICP</i>	40
Tabela 8 - Dados de <i>ICP</i> Pós-tratamento	41
Tabela 9 - Conversão de Elemento para Óxido (wt%) - Elementos Maiores.....	42
Tabela 10 - ETR + Y — Normalização por Condrito	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM – Agência Nacional de Mineração

ASGMI – *Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos*

CBL – Companhia Brasileira do Lítio

CCDC – *Cambridge Crystallographic Data Centre*

CIF – Arquivo de Informação Cristalográfica (*Crystallographic Information File*)

CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais

DRX (ou XRD) – Difração de Raios X (*X-Ray Diffraction*)

EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia

EPA – *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

ETR (ou REE) – Elementos Terras Raras (*Rare Earth Elements*)

GOF – *Goodness of Fit* (parâmetro que indica a qualidade do ajuste no refinamento)

GSAS-II – *General Structure Analysis System II*

IA – Inteligência Artificial

ICP – Plasma Indutivamente Acoplado (*Inductively Coupled Plasma*)

ICP-MS – Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado

ICP-OES – Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

ICSD – *Inorganic Crystal Structure Database*

IRB – Indexação das Reflexões de Bragg

LCT – Família de pegmatitos rica em Lítio, Césio e Tântalo

LD – Limite de Detecção

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MLE – Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation*)

MME – Ministério de Minas e Energia

NYF – Família de pegmatitos rica em Nióbio, Ítrio e Flúor

PO – Orientação Preferencial (Preferred Orientation)

RE – Refinamento Estrutural

Rexp – *Expected R-factor*

Rwp – *Weighted Pattern R-factor*

SGB/CPRM – Serviço Geológico do Brasil/ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

SMP – Amostra (Sample)

STD – Amostra de referência (Standard)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Trabalhos Anteriores	14
1.2	Justificativa.....	16
1.3	Área de Estudo.....	17
1.4	Objetivo	18
1.4.1	<i>Objetivo Específico</i>	18
2	METODOLOGIA.....	19
2.1	Métodos de Análises.....	19
2.1.1	<i>Identificação das Fases Cristalinas</i>	19
2.1.2	<i>Determinação da composição química e do teor de lítio</i>	20
2.2	Softwares	21
2.3	Tratamento de Dados.....	22
2.4	Declaração de uso de Inteligência Artificial - IA	24
3	CONTEXTO GEOLÓGICO	25
3.1	Regional.....	25
3.2	A Província Pegmatítica Oriental do Brasil	31
3.3	Local	31
3.4	Geoquímica dos Pegmatitos	33
3.4.1	<i>Classificação dos pegmatitos</i>	34
3.5	Pegmatitos da Mina da Cachoeira	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	Composição Elementar (ICP).....	39
4.1.1	<i>Elementos Maiores</i>	42
4.1.2	<i>Elementos Terras Raras (ETR)</i>	43
4.1.3	<i>Elementos Traços</i>	47
4.1.4	<i>Análise Multielementar dos Dados de ICP-MS e ICP-OES</i>	49

4.2	Análise de Fases Cristalinas por DRX e Refinamento <i>Rietveld</i>	52
5	CONCLUSÃO.....	62
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	64

1 INTRODUÇÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se insere no contexto das pesquisas de Iniciação Científica desenvolvidas por Nelvam (2024) e Rodrigues Lima (2025), buscando aprofundar a caracterização do pegmatito e seus minerais, com foco no espodumênio, mineral portador de lítio. A continuidade do projeto está correlacionada com a parceria entre o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), e a Companhia Brasileira do Lítio (CBL), que juntas forneceram amostras de minerais e pegmatito provenientes da região. A CBL atua na extração e no beneficiamento de minérios de lítio provenientes da região de Araçuaí. Enquanto o SGB/CPRM é um órgão federal vinculado ao Ministério de Minas e Energia (MME).

A crescente demanda por minerais estratégicos, impulsionada pelo avanço da indústria e pela busca global por soluções de diminuição de gases poluentes, justificam o interesse de mercado em pesquisas no mineral supracitado e os minerais que o correlacionam. Os combustíveis fósseis, por exemplo, conforme a Agência Brasil (2023), representa 28% das emissões globais de gás carbônico (CO₂).

Tabela 1 - Aplicação das três formas comerciais do lítio e suas aplicações

	Fonte	Usos
Minérios/ Concentrado	amblygonita	Compostos químicos, esmaltes;
	espodumênio	Cerâmicas, vidros, compostos químicos;
	lepidolita	Vidros, cerâmica;
	petalita	Cerâmica, polidores, esmaltes, vidros;
Metal	Desoxidação, degaseificação, ligas, compostos orgânicos, borracha, suplementos de vitaminas e minerais, energia nuclear, baterias;	
Químicos	brometo	Absorção de CO ₂ , refrigeração
	butil-lítio	Polimerização, produtos farmacêuticos, síntese orgânica
	carbonato	Cerâmica, compostos químicos, fundentes, produtos farmacêuticos, cubas de eletrólise de Al
	cloreto	Lítio metálico, fundente, fibras sintéticas, traçadores, desumidificação
	fluoreto	Porcelanas, esmaltes, polidores, soldas de elevada resistência, ótica
	hidróxido	Graxas, sais de Li, absorção de CO ₂

(Fonte: Warner, 2015)

A urgência na transição energética global e no armazenamento de energia renovável tem levado a um aumento na procura por lítio no Brasil e no mundo, com projeção de demanda cerca de 4 milhões de toneladas até 2035 (STATISTA, 2023). Dentro deste contexto, o Brasil ganha destaque pois possui uma reserva estimada de aproximadamente 642 mil toneladas de Li₂O, conforme a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2023). Os principais concentrados de lítio produzidos no Brasil são provenientes do espodumênio, lepidolita, petalita e amblygonita, com diferentes proporções em suas composições. Em 2022, o Brasil produziu 143

mil toneladas de concentrado de espodumênio com teor médio de 5,3% de Li₂O. A comercialização do mineral no país gerou um valor de quase 1,7 bilhão de reais (ANM/Relatório Anual de Lavra, 2023). Como definido por Harben (2002), os principais minerais de lítio são: a lepidolita, o espodumênio, a petalita e a amblygonita (TAB. 2). Pertencente ao grupo dos piroxênios, o espodumênio apresenta fórmula química LiAlSi₂O₆ com estrutura cristalina monoclinica, sendo caracteristicamente associado aos pegmatitos graníticos (Claffy, 1955). O espodumênio, em sua ocorrência nos pegmatitos, está frequentemente associado a outros minerais acessórios que compõem o ambiente geológico. Entre eles, destacam-se o quartzo, a grafita, minerais do grupo da turmalina (olenita e dravita) e feldspatos alcalinos (albita e microclina). Estes minerais associados são compostos majoritariamente por elementos como Si, C, Na, Al, Mg e K. As diferentes composições resultam em uma variedade de sistemas cristalinos, como o trigonal (quartzo e turmalina), o triclinico (feldspato) e o hexagonal (grafita) (Deer *et al.* 1966).

Tabela 2 - Os principais minerais de lítio

Minerais	Fórmula	Densidade (g/cm ³)	Dureza (Mohs)	%Li ₂ O	
				Teórica	Típica
espodumênio	LiAl(Si ₂ O ₆)	3 - 3,2	6,5 - 7,5	8	1,5 - 7,0
lepidolita	$\frac{K(Li,Al_3)}{(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2}$	2,8 - 3,3	2,5 - 3	3,3 - 7,8	3,0 - 4,0
petalita	LiAl(Si ₄ O ₁₀)	2,3 - 2,5	6 - 6,5	4,9	3,0 - 4,5
amblygonita	LiAl(PO ₄)(F,OH)	3	5,5 - 6	11,9	5

Fonte: Harben, (2002)

1.1 Trabalhos Anteriores

Os estudos anteriores, conduzidos por Nelvam (2024) e Rodrigues Lima (2025), consistiram na caracterização detalhada dos minerais que compõem a amostra de pegmatito (FIG. 1), proveniente do distrito pegmatítico de Araçuaí, situado no Vale do Rio Jequitinhonha, no nordeste do estado de Minas Gerais.

Figura 1 - Amostra de pegmatito proveniente da Mina da Cachoeira, Araçuaí, Minas Gerais, contendo cristais de espodumênio, quartzo e feldspato. O paquímetro foi utilizado como escala.



Fonte: Rodrigues Lima (2025)

Na primeira etapa, Nelvam (2024) realizou a caracterização de minerais brutos, enquanto, na segunda etapa, Rodrigues Lima (2025) desenvolveu estudos em uma amostra de pegmatito. Para a identificação e caracterização mineralógica, foram empregadas técnicas como Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia *Raman*. A difração de raios X e a espectroscopia *Raman* foram empregadas na identificação das fases minerais, enquanto o refinamento pelo método de *Rietveld* foi utilizado para estimar suas proporções, a partir das quais foram identificados os seguintes minerais: espodumênio, quartzo, grafita, minerais do grupo da turmalina, feldspatos alcalinos (microclina e albita) e muscovita. Os valores quantitativos das fases minerais foram: albita (69,97%), muscovita (1,38%), quartzo (13,12%) e espodumênio (15,33%) (Rodrigues Lima, 2025). A TAB. 3 apresenta as descrições dos minerais identificados nas pesquisas de iniciação científica.

Embora os estudos de Nelvam (2024) e Rodrigues Lima (2025) tenham identificado as principais fases minerais e estimado suas proporções por refinamento Rietveld, a concentração de lítio da amostra ainda não havia sido determinada por método químico direto. Além disso, não havia sido avaliada a compatibilidade entre o teor de lítio obtido por ICP e a proporção de espodumênio estimada por difração de raios X.

Tabela 3 - Minerais associados a amostra de pegmatito

Mineral	Fórmula Química	Cor	Geminação	Dureza (Mohs)	Densidade (g/cm ³)	Sistema Cristalino
espodumênio	LiAlSi ₂ O ₆	Incolor, branca acinzentada, roxa, verde, amarela, lilás.	Frequente, segundo {100}.	6,5 - 7	3,1 – 3,2	Monoclínico
quartzo	SiO ₂	Incolor, branca, verde, azul, amarelo, roxo, preta, rosa, vermelho, laranja, etc.	Eixo de macla z; Plano de Macla {1120} e {1122}.	7	2,65 – 2,66	Trigonal
grafita	C	Preto a cinza.	Em {1121}, por estrias trigonais ou hexagonais em {0001}.	1 - 2	2,09 – 2,23	Hexagonal
Grupo Turmalina	(Na,Ca)(Fe ²⁺ ,Fe ³⁺ ,Mg,Al,Li) ₃ (Al,Fe ²⁺ ,Cr ³⁺ ,Mg) ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (O,OH,F) ₄	Vermelho, azul, verde, incolor, preto, rosa.	Rara em {1011} e {4041}.	7	2,9 – 3,1	Trigonal
feldspato alcalino	KAlSi ₃ O ₈ Na(AlSi ₃ O ₈)	Branco, cinza, rosa, verde, amarelo, etc.	Presente (Carlsbad).	6	2,5 – 2,6	Triclínico
muscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Incolor, tons de verde, vermelho, castanho.	Clivagem perfeita em {001}; Plano de composição (001), eixo de geminação [310]	2,5	2,77 – 2,88	Monoclínico

Fonte: Rodrigues Lima (2025). Adaptado de Deer *et al.* (1966); Didático/ USP (2025); Mindat (2025)

1.2 Justificativa

O contexto no qual o trabalho se insere demonstra a importância do presente projeto, visando contribuir para o entendimento dos pegmatitos graníticos e as suas fases minerais, com foco no mineral de minério de lítio, o qual apresenta crescente demanda para a produção de produtos tanto na indústria brasileira quanto na mundial (TAB. 1). Embora os trabalhos anteriores tenham identificado e quantificado as principais fases mineralógicas da amostra, ainda não foi determinada diretamente a concentração de lítio nem avaliada sua compatibilidade com a proporção de espodumênio obtida por refinamento *Rietveld*

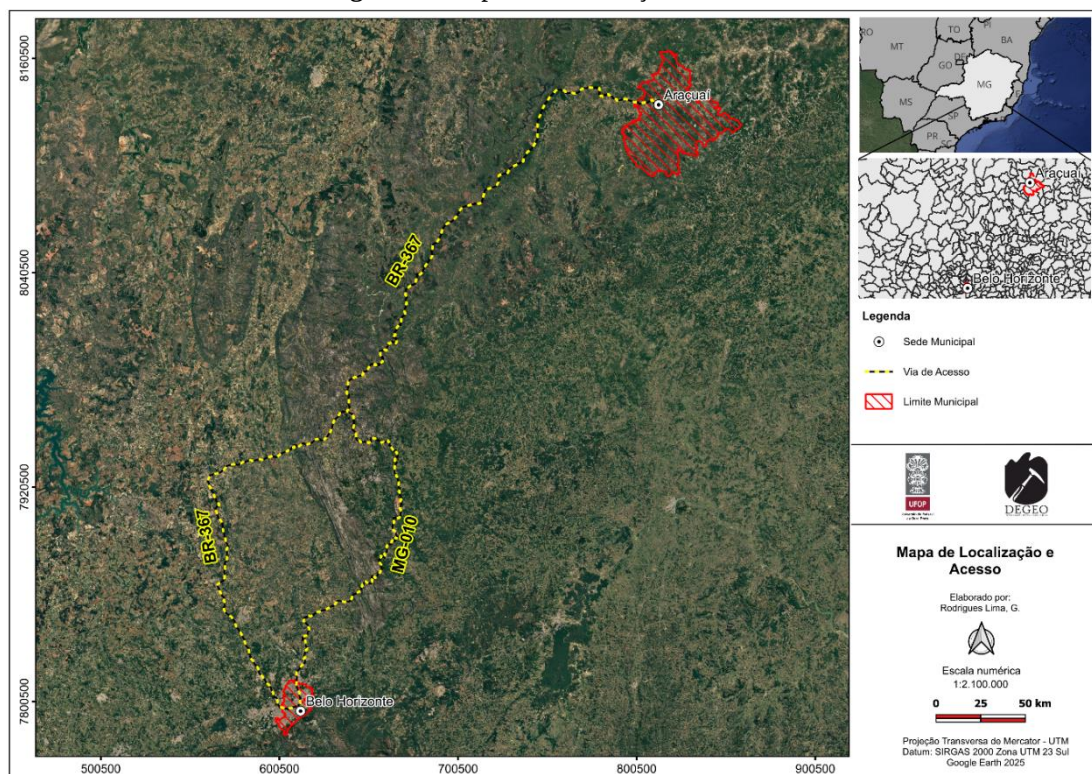
Adicionalmente, o entendimento dos minerais acessórios é relevante, pois influenciam diretamente no beneficiamento do espodumênio, os quais também apresentam subprodutos. A identificação e a avaliação do potencial de aproveitamento dessas fases podem contribuir para a valorização econômica do minério, especialmente quando minerais como feldspatos e quartzo apresentam características adequadas para recuperação como subprodutos.

1.3 Área de Estudo

A rocha de estudo é proveniente do empreendimento mineral localizado no município de Araçuaí (FIG. 2), situado na região nordeste do estado de Minas Gerais, no Vale do Rio Jequitinhonha. A região pertence à província pegmatítica do Leste de Minas Gerais, estando no contexto do orógeno Araçuaí.

O trajeto até a Mina da Cachoeira, da Companhia Brasileira de Lítio, tem início no município de Ouro Preto, seguindo-se inicialmente pela rodovia BR-356 em direção a Belo Horizonte. A partir da capital, acessa-se a BR-040 no sentido norte, prosseguindo até o entroncamento com a BR-367. Por essa rodovia, segue-se em direção ao Vale do Jequitinhonha, passando por municípios como Diamantina, até alcançar o município de Araçuaí, onde se localiza o empreendimento. O acesso final à mina é realizado por estradas locais a partir da sede municipal. A Mina da Cachoeira encontra-se a aproximadamente 560 km de Belo Horizonte e a cerca de 690 km de Ouro Preto.

Figura 2 - Mapa de Localização e Acesso.



Fonte: Rodrigues Lima (2026).

1.4 Objetivo

O presente projeto tem como objetivo dar continuidade e aprofundar as pesquisas de Nelvam (2024) e Rodrigues Lima (2025) acerca da mineralogia de pegmatitos em Araçuaí/MG, compreender a caracterização detalhada das fases cristalinas e realizar a análise quantitativa mineral, com foco no espodumênio, visando estabelecer o teor de Li_2O da amostra de pegmatito.

1.4.1 Objetivo Específico

1. Analisar os difratogramas de raios X e os espectros *Raman* obtidos na etapa inicial da pesquisa, visando à identificação das fases minerais presentes na amostra;
2. Realizar o refinamento dos difratogramas pelo método de *Rietveld*, a fim de quantificar as fases cristalinas presentes na amostra;
3. Determinar a concentração de Li por *ICP-OES* e *ICP-MS*, e calcular o teor equivalente de Li_2O ;
4. Determinar os parâmetros de cela unitária do espodumênio e avaliar eventuais variações em relação aos valores de referência.

2 METODOLOGIA

2.1 Métodos de Análises

2.1.1 Identificação das Fases Cristalinas

A amostra pegmatito corresponde a uma amostra de pegmatito total/fração mineral/concentrado de espodumênio, proveniente da Mina da Cachoeira em Araçuaí/MG. Na primeira parte da análise das fases minerais, foram empregados diferentes métodos, dentre os quais se destacam a difração de raios X, a aplicação do método Refinamento *Rietveld* sobre os dados de DRX e a Espectroscopia *Raman*. A difração de raios X, conforme descrito por Pecharsky & Zavalij (2005), é um fenômeno físico no qual ondas eletromagnéticas (raios X) interagem com os átomos presentes na estrutura cristalina de um sólido cristalino, resultando em um padrão de dispersão característico. Segundo a lei de Bragg, a interferência construtiva da radiação espalhada pelos planos cristalográficos ocorre em ângulos específicos, originando as reflexões observadas no difratograma. A amostra para análise foi preparada a partir do pegmatito, do qual foram quebradas partes da amostra que posteriormente, foram moídos em um almofariz de ágata até se tornarem um pó. A coleta de dados de raios X do espodumênio foi realizada no Difrátometro X'Pert PRO (PANalytical) com os seguintes parâmetros: radiação $\text{CuK}\alpha$ (1,54 Å, 40 kV, 40 mA) e intervalo de coleta de 5° a 100° (2 θ) em geometria de reflexão. O equipamento utilizado pertence ao Laboratório de Crescimento e Caracterização de Materiais Cristalinos situado no departamento de física da Universidade Federal de Ouro Preto.

O refinamento pelo método de *Rietveld* baseia-se no ajuste de um padrão calculado ao difratograma experimental, permitindo refinar parâmetros instrumentais, de perfil e cristalográficos, além de estimar as proporções das fases cristalinas presentes. O refinamento estrutural envolve o ajuste de parâmetros como dimensões da cela unitária, posições atômicas, ocupações dos sítios e parâmetros de deslocamento atômico, conforme a qualidade e a resolução dos dados disponíveis. Já a IRB refere-se à indexação dos picos de difração com base nos parâmetros de rede e no grupo espacial. Ambos os métodos foram utilizados para refinar e ajustar o padrão obtido por difração de raios X, possibilitando a quantificação das fases cristalinas previamente identificadas (Kinast, 2000).

A espectroscopia Raman foi utilizada como técnica complementar para a identificação mineralógica, com base no espalhamento inelástico da luz e nos modos vibracionais característicos das fases analisadas. Conforme Soto Gómez (2018), o *Espalhamento Raman* é

um método não destrutivo em que se utiliza de luz laser no intervalo que abrange as regiões do espectro UV, visível e infravermelho para investigar a região dos modos vibracionais característicos de átomos, íons e moléculas (região de “*fingerprint*”). A partir disso, obtém-se um espectro característico que reflete as vibrações internas das ligações químicas presentes na estrutura da amostra, onde ligações mais fortes vibram em frequências mais altas e menos fortes em menores frequências (Nakamoto, 2009).

2.1.2 Determinação da composição química e do teor de lítio

Na técnica de *ICP-OES/ICP-MS*, a solução da amostra é nebulizada e introduzida em um plasma de argônio, no qual os elementos são atomizados, excitados ou ionizados antes da detecção. Esse gás é geralmente o argônio (Ar), com menos de 1% de ionização no plasma, e fica confinado em um tubo de quartzo mantido por uma fonte de radiofrequência. O sistema opera com frequências entre 27 e 40 MHz e potências que variam de 0,5 a 2,5 kW. Nesse ambiente, as amostras são introduzidas no centro do plasma na forma de aerossol (Olesik, 1991). A partir dessa fonte de plasma, Tyler (2015) descreve as duas principais técnicas analíticas. A primeira é o ICP-OES (Espectroscopia de Emissão Óptica), que mede a intensidade dos fótons emitidos quando os átomos excitados retornam a estados de menor energia. A segunda é o ICP-MS (Espectrometria de Massa), que realiza a detecção dos íons gerados no plasma, permitindo a leitura das massas atômicas individuais em Daltons e fornecendo informações isotópicas.

Os limites de detecção variam conforme a técnica empregada, o elemento analisado, a matriz da amostra, a diluição e as condições instrumentais. Entretanto, o método apresenta algumas limitações, como dificuldades na análise direta de sólidos não dissolvidos, possíveis interferências espectrais, limites de detecção elevados para determinados elementos e precisão insuficiente em situações específicas (Tyler, 2015).

A amostra foi enviada ao laboratório da empresa Geosol, situado em Antônio Pereira, Minas Gerais, por meio da CPRM. A preparação da amostra seguiu-se o seguinte protocolo: inicialmente, o material passou por secagem a aproximadamente 105°C e britagem de 75% da amostra até 3 mm. Posteriormente, foi realizada a pulverização de 250 g do material, garantindo que 95% da massa passasse em malha de 150 mesh. Ambas as técnicas analíticas baseadas na fonte de ICP foram empregadas no trabalho para buscar uma compreensão mais precisa da amostra de pegmatito da Mina da Cachoeira. Para a análise química, utilizou-se o método de fusão com peróxido de sódio para a abertura da amostra. O *ICP-OES* foi utilizado principalmente para a determinação de elementos-traço em concentrações da ordem de partes

por milhão (ppm) ou superiores, permitindo análises multielementares simultâneas. Por sua vez, o *ICP-MS* foi utilizado para a quantificação de elementos-traço em níveis de partes por bilhão (ppb) a partes por trilhão (ppt). Essa técnica possibilitou a obtenção de informações isotópicas e garantiu maior sensibilidade analítica, mesmo na presença de interferências espectrais (Tyler, 2015).

2.2 Softwares

A interpretação e o processamento dos dados coletados foram realizados por meio de diferentes *softwares*, com funções distintas para assegurar a compreensão dos resultados analíticos.

O *QualX2* (Altomare, 2015) foi utilizado na etapa inicial para a identificação qualitativa das fases cristalinas. O programa permitiu a localização dos picos de difração nos dados de Difração de Raios X (DRX) e a busca por fases compatíveis com a mineralogia esperada do pegmatito granítico.

Para o refinamento *Rietveld* final e a quantificação das fases cristalinas presentes na amostra, usou-se o *TOPAS Academic* (Coelho, 2018). Em que os resultados quantitativos apresentados no Capítulo 4 derivam deste *software*, que foi empregado especificamente para determinar as proporções das fases cristalinas (como o percentual de 60,19% para o espodumênio) e não a composição química elementar total. O refinamento no *TOPAS* envolveu o ajuste de parâmetros fundamentais, incluindo o fator de escala, o fundo (*background*), o deslocamento de zero e os parâmetros de cela unitária. Também foram refinados a orientação preferencial (modelo de *March-Dollase*), o tamanho de cristalito e as posições atômicas. A qualidade do ajuste foi validada por meio dos critérios estatísticos de *Rwp* (27,29), *Rexp* (18,61) e pelo *Goodness of Fit* (GOF) de 1,47.

O *GSAS-II* (*General Structure Analysis System II*) (Toby, 2013) foi empregado de forma a compreender de maneira preliminar os picos observados com os teóricos, permitindo a integração dos dados e à análise pelo método de *Rietveld* em que se buscou a comparação entre os dois *softwares*. O uso de ambos os programas, o *TOPAS* e do *GSAS-II*, permitiu verificar a consistência dos resultados. Portanto, o *GSAS-II* foi utilizado como uma ferramenta de conferência e validação, assegurando a definição do refinamento final no *TOPAS*.

Para a visualização tridimensional e representação gráfica da estrutura cristalina, utilizou-se o *software Mercury*.

Por fim, para a compreensão do espalhamento *Raman*, foi empregado o *CrystalSleuth* (Laetsch, 2006), vinculado ao banco de dados do projeto *RRUFF* da faculdade do Arizona.

Possibilitando a interpretação dos espectros coletados e os padrões de referência. A identificação dos minerais baseou-se na correspondência de bandas diagnósticas, permitindo o reconhecimento das fases minerais, como o espodumênio.

2.3 Tratamento de Dados

Os resultados analíticos foram inicialmente avaliados quanto aos limites de detecção, unidades e qualidade dos materiais de referência. Portanto, para uma melhor caracterização dos dados analíticos geoquímicos e adequada interpretação dos fenômenos associados, é necessário o tratamento prévio desses dados.

Um dos problemas dos dados geoquímicos é a presença dos chamados dados censurados, identificados pelo símbolo “<”, representando valores abaixo do limite de detecção (LD), em que os elementos foram expressos em ppm. Dessa forma, torna-se necessário o tratamento desses dados antes de sua interpretação (ASGMI, 2022). A *Environmental Protection Agency* (EPA, 2006) propõe as seguintes diretrizes para esse procedimento: quando menos de 15% dos dados totais encontram-se censurados, recomenda-se a substituição dos valores por LD/2 ou a aplicação do método de máxima verossimilhança (MLE); entre 15% e 50%, recomenda-se o uso do MLE, e, quando entre 50% e 90% dos dados são censurados, recomenda-se a estimativa apenas dos percentis situados acima da porcentagem censurada.

Baseando-se nas recomendações da EPA (2006), a proporção de dados censurados deste trabalho foi de aproximadamente 59% (33 dos 56 elementos), o que sugeriria a aplicação da estimativa de percentis. Entretanto, para viabilizar a representação gráfica em escalas logarítmicas e a análise visual comparativa de todos os elementos, optou-se pela substituição dos valores censurados por metade do limite de detecção (LD/2). É importante ressaltar que essa substituição teve finalidade predominantemente ilustrativa e para assegurar o rigor científico, as interpretações geoquímicas e discussões petrológicas foram direcionadas exclusivamente aos elementos da fração não censurada (41% do total), evitando que valores imputados artificialmente enviesassem as conclusões sobre a evolução do magma. No que se refere à amostra de referência (Standard - STD), o tratamento diferiu da amostra do pegmatito (SMP). Para a STD, procedeu-se apenas à remoção do caractere indicativo de censura (o símbolo '<'), mantendo-se o valor nominal do limite de detecção para os cálculos (ex: um valor reportado como '<10' foi tratado como '10'). Esta medida foi adotada para preservar a integridade dos limites estabelecidos pelo laboratório e garantir que a base de comparação (o

padrão) não sofresse as mesmas manipulações matemáticas aplicadas à amostra de estudo, evitando distorções dos dados.

Dentro deste contexto, foram plotados três gráficos distintos, de linhas, para os elementos, sendo dois para a distinção dos grupos de elementos, nos quais foram separados os elementos traços e ETR (Elementos Terras Raras). Os elementos foram classificados como maiores, menores ou traços com base em suas concentrações. Para fins de representação gráfica, os elementos menores foram incluídos junto aos elementos-traço, conforme critério explicitado a seguir. O terceiro gráfico gerado foi o de razão, para a compreensão do enriquecimento e empobrecimento dos mesmos.

Foram considerados os óxidos dos elementos maiores Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti e P, além de Li_2O , em razão do foco do trabalho em uma amostra portadora de espodumênio. O Si e Na não foram reportados pelo método analítico utilizado pelo laboratório e, por essa razão, o teor de SiO_2 e Na_2O não foram incluídos nas comparações, uma vez que o silício sofre volatilização durante o processo de preparação da amostra por via ácida, método necessário para a quebra das cadeias Si-O (Arslan, 2024). Da mesma forma, o sódio (Na_2O) apresenta desafios analíticos por ser um elemento facilmente ionizável e bastante presente no ambiente, o que pode interferir na precisão dos demais resultados (Arslan, 2024).

Os valores de ICP, inicialmente em ppm, foram convertidos para porcentagem em peso (wt.%) utilizando a fórmula: $\text{óxido (wt.\%)} = (\text{ppm elemento} / 10000) \times \text{fator de conversão}$ (Rollinson, 1993), o fator de conversão é expresso pela expressão $F = \text{massa molar do óxido} / \text{massa correspondente do elemento no óxido}$. A definição de quais elementos seriam considerados menores ou maiores foi embasada em Rollinson (1993), que estabelece que elementos maiores são aqueles que representam mais de 1% da amostra. Os elementos terras raras compreendem os lantanídeos e, em abordagens geoquímicas, frequentemente incluem o ítrio em razão de suas afinidades geoquímicas, normalizados pelos valores condriticos apresentados por Boynton (1984), para a construção do diagrama de Masuda-Coryell, em que a normalização é calculada por meio da fórmula $ETR_N = \text{Concentração do ETR na amostra} / \text{concentração do ETR no valor condritico}$. Os elementos nos gráficos foram dispostos da seguinte maneira: para os traços, utilizou-se o número atômico, e para os ETR, a própria ordem da tabela periódica.

2.4 Declaração de uso de Inteligência Artificial - IA

Conforme a Portaria nº 2.664/2026, que institui a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq, em seu Capítulo III, Art. 9º, inciso I, alínea "c", reforça-se a transparência do uso de IA em trabalhos do meio acadêmico, determinando que seja indicado na obra como e quando a ferramenta foi utilizada, sem que haja plágio.

A ferramenta Claude foi empregada como apoio na elaboração de fórmulas para uma planilha de conversão de concentrações elementares em óxidos e de normalização dos ETR. Todas as fórmulas, fatores de conversão e resultados foram posteriormente conferidos pelo autor com base nas referências metodológicas adotadas.

No que diz respeito ao uso de inteligência artificial para a organização de ideias, a ferramenta NotebookLM foi empregada na estruturação da ordem dos capítulos. Esse uso é observado no capítulo referente ao contexto geológico, onde foi proposta uma organização da escala macro para a micro. O arranjo inicia-se pelo contexto regional e torna-se mais específico até estabelecer a descrição geoquímica da Mina da Cachoeira. A mesma lógica é estabelecida para os resultados, realizando a organização das ideias primeiramente com os dados de rápida leitura e partindo, então, para a descrição detalhada.

Para o uso de correção gramatical e semântica, estabeleceu-se sempre a prerrogativa da não interferência na escrita no que diz respeito à inserção de novas ideias ao texto. A utilização ocorreu, portanto, em caráter totalmente restrito aos aspectos formais do texto.

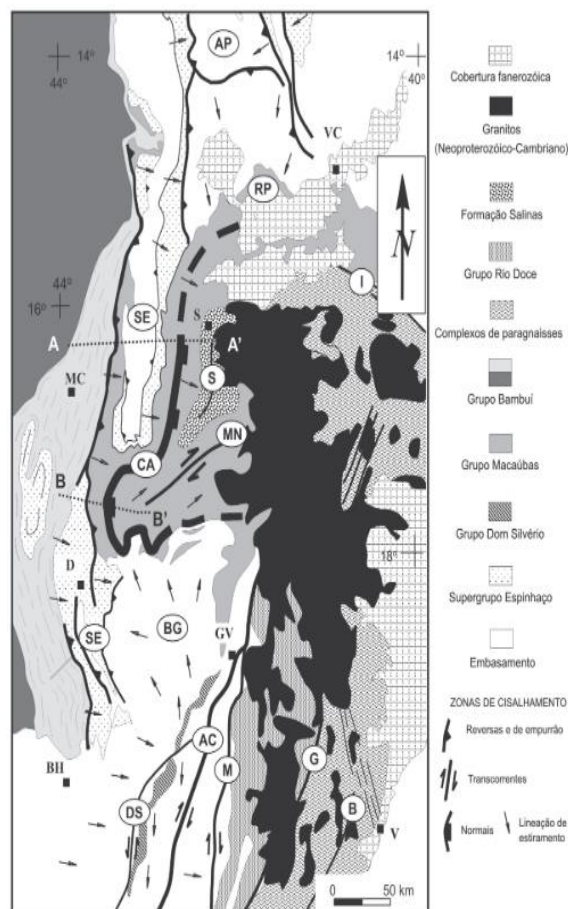
As ferramentas de inteligência artificial não foram utilizadas para gerar ou alterar dados analíticos. Ademais, assegura-se que toda e qualquer utilização de inteligência artificial foi devidamente verificada e validada pelo autor.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Regional

Situada na região nordeste do estado de Minas Gerais, a área de estudo está inserida no contexto do Orógeno Araçuaí (FIG. 3e FIG. 7), que se estende na margem oriental do Cráton São Francisco entre os estados de Minas Gerais, Bahia e Espírito Santo. Este contexto geológico Neoproterozóico brasileiro foi desenvolvido durante a aglutinação do supercontinente Gondwana, entre o Brasil e a África, possuindo como contraparte o Orógeno do Oeste do Congo (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001; Alkmim *et al.*, 2006).

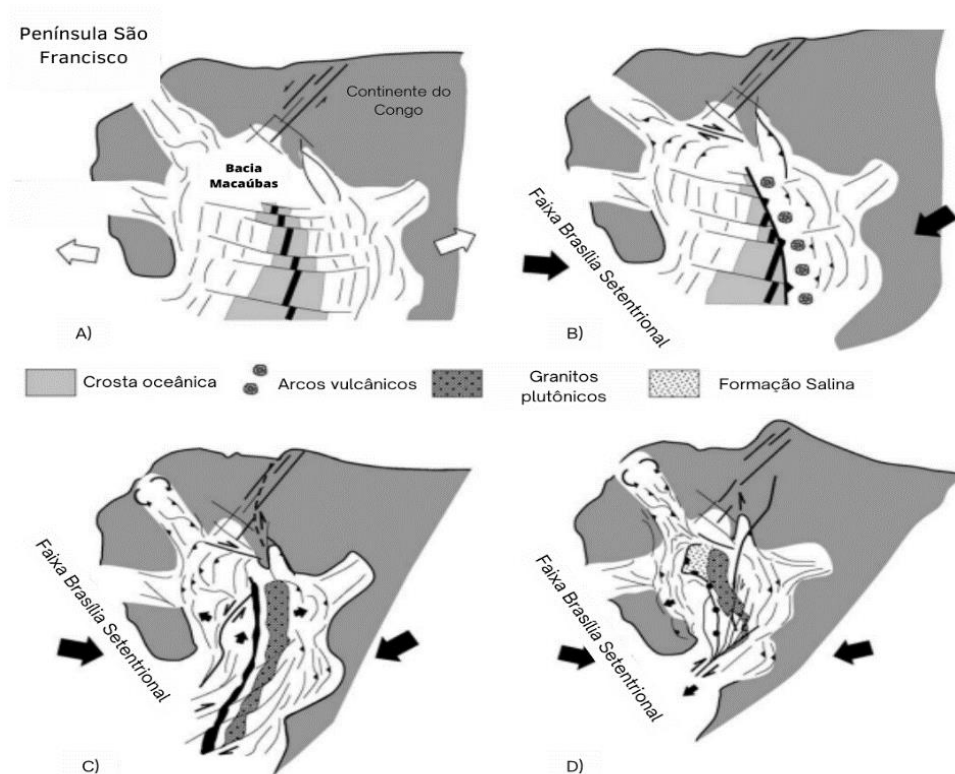
Figura 3 - Mapa tectônico esquemático do Orógeno Araçuaí enfatizando os seus compartimentos e grandes zonas de cisalhamento. Serra do Espinhaço Meridional; CA: Zona de Cisalhamento da Chapada Acauã; S: Zona de dobramentos de Salinas; MN: Corredor transpressivo d de Minas Novas; RP: Saliência do Rio Pardo e zona de interação com o Aulacógeno do Paramirim; BG: Bloco de Guanhões; DS: Zona de Cisalhamento de Dom Silvério; I: Zona de Cisalhamento de Itapebi; AC: Zona de Cisalhamento de Abre Campo; M: Zona de Cisalhamento de Manhuaçu; G: Zona de Cisalhamento de Guacuí; B: Zona de Cisalhamento de Batatal.



Fonte: Alkmim *et al.* (2007).

Durante o Toniano houve início do evento distensivo da evolução do Orógeno Araçuai-Congo Ocidental, ocasionando o rifteamento continental marcando a bacia precursora da Macaúbas, registrando os estágios de evolução desde o rifte até o de margem passiva, junto à formação do assoalho oceânico (GROSSI-SAD *et al.*, 1997; NOCE *et al.*, 1997; PEDROSA-SOARES *et al.*, 1998). O fechamento da bacia foi marcado pelo evento denominado “Tectônica de Quebra-nozes”, o modelo, segundo Alkmin (2006), descreve o fechamento da bacia por um processo de indução à distância ocasionado pelo impacto da placa do Paraná (ou Rio de la Plata) contra a península do São Francisco, resultando na rotação em sentido anti-horário, em direção à península do Congo (FIG. 4).

Figura 4 - Esquema representativo da evolução do Orógeno Araçuai. A) Abertura da Bacia Macaúbas por rifteamento, há cerca de 800Ma. B) Colisões provocam o fechamento da Bacia Macaúbas, por volta de 600Ma. C) Desenvolvimento do orógeno, há 570 Ma. D) Escape do orógeno para sul, 500 Ma.

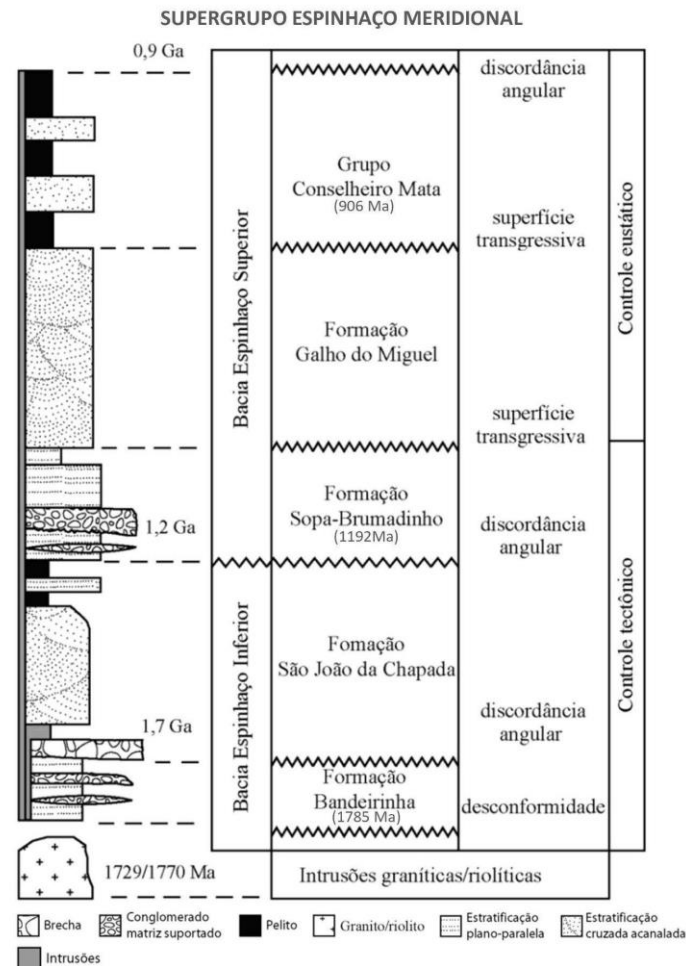


Fonte: Modificado de Alkmim *et al.* (2007).

Durante o Pré-cambriano, ocorreram dois eventos de rifting que foram importantes para a formação geológica do interior do Cráton Espinhaço-Congo. O primeiro evento, que ocorreu em torno de 1,75 Ga (Paleo/Mesoproterozoico), resultou no rifte Espinhaço com uma sequência

de rochas vulcânicas, quartzitos, conglomerados, pelitos e carbonatos, definindo então o Supergrupo Espinhaço, aflorando na margem oeste do Orógeno Araçuai e no Aulacógeno Paramirim (FIG. 5) (Alkmim *et al.*, 2006).

Figura 5 - Coluna estratigráfica do Supergrupo Espinhaço.

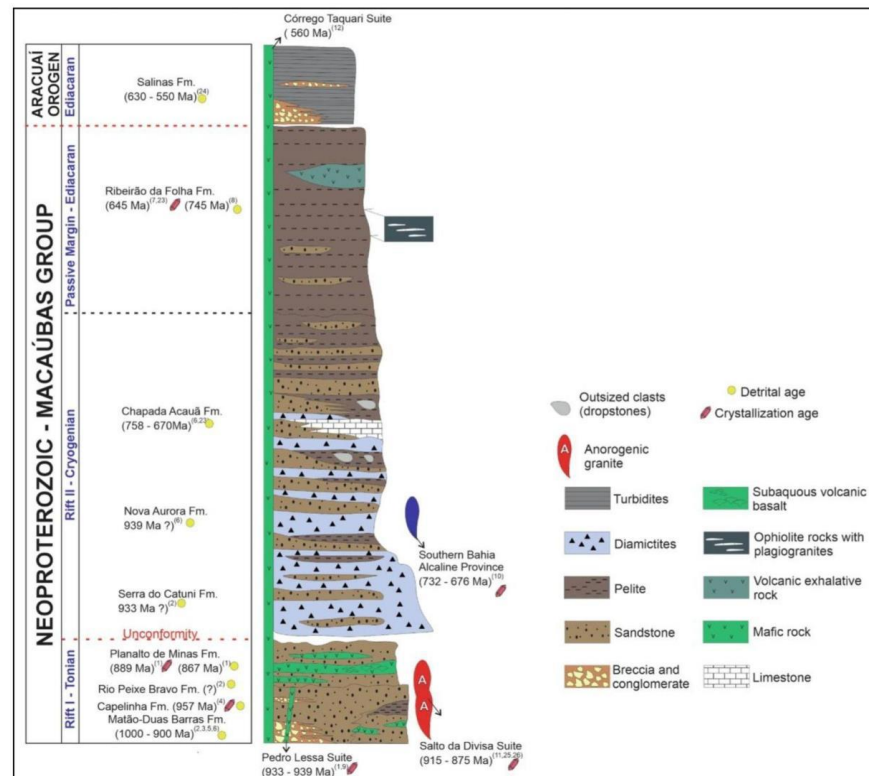


Fonte: Chemale Jr. *et al* (2011).

Posteriormente, dentro do contexto da tectônica do “Quebra-Nozes”, o rifte Macaúbas representa o segundo evento de rifteamento relevante para a consolidação da geologia do orógeno, iniciando em torno de 800 Ma (Neoproterozoico). Este evento levou à formação da bacia Macaúbas (FIG. 6), uma bacia oceânica estreita desenvolvida entre os crátons do São Francisco e do Congo (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001; Alkmim *et al.*, 2006). O rifte foi forçado pelo soerguimento crustal causado por uma pluma astenosférica (Correa-Gomes e Oliveira, 1997; Martins-Neto, 1998), resultando em um terreno em que os dois crátons ainda se encontravam ligados, gerando uma litosfera oceânica que evoluiu progressivamente (Alkmim

et al., 2006). A deposição sedimentar da bacia, compreendeu-se no Neoproterozoico, onde depósitos proximais afloram na parte ocidental, ao leste e sul, têm-se seções pelíticas distais intercaladas com turbiditos (Uhlein *et al.*, 1999; Martins-Neto e Hercos, 2000; Martins-Neto *et al.*, 2001). Por fim, há os depósitos distais metamorfizados na fácies anfibolito, representando a Formação Ribeirão da Folha (Lima *et al.*, 2002).

Figura 6 - Coluna estratigráfica do Grupo Macaúbas e do Cinturão West-Congo.



Fonte: Modificado e atualizado após Pedrosa-Soares *et al.* (2011); Souza *et al.* (2022).

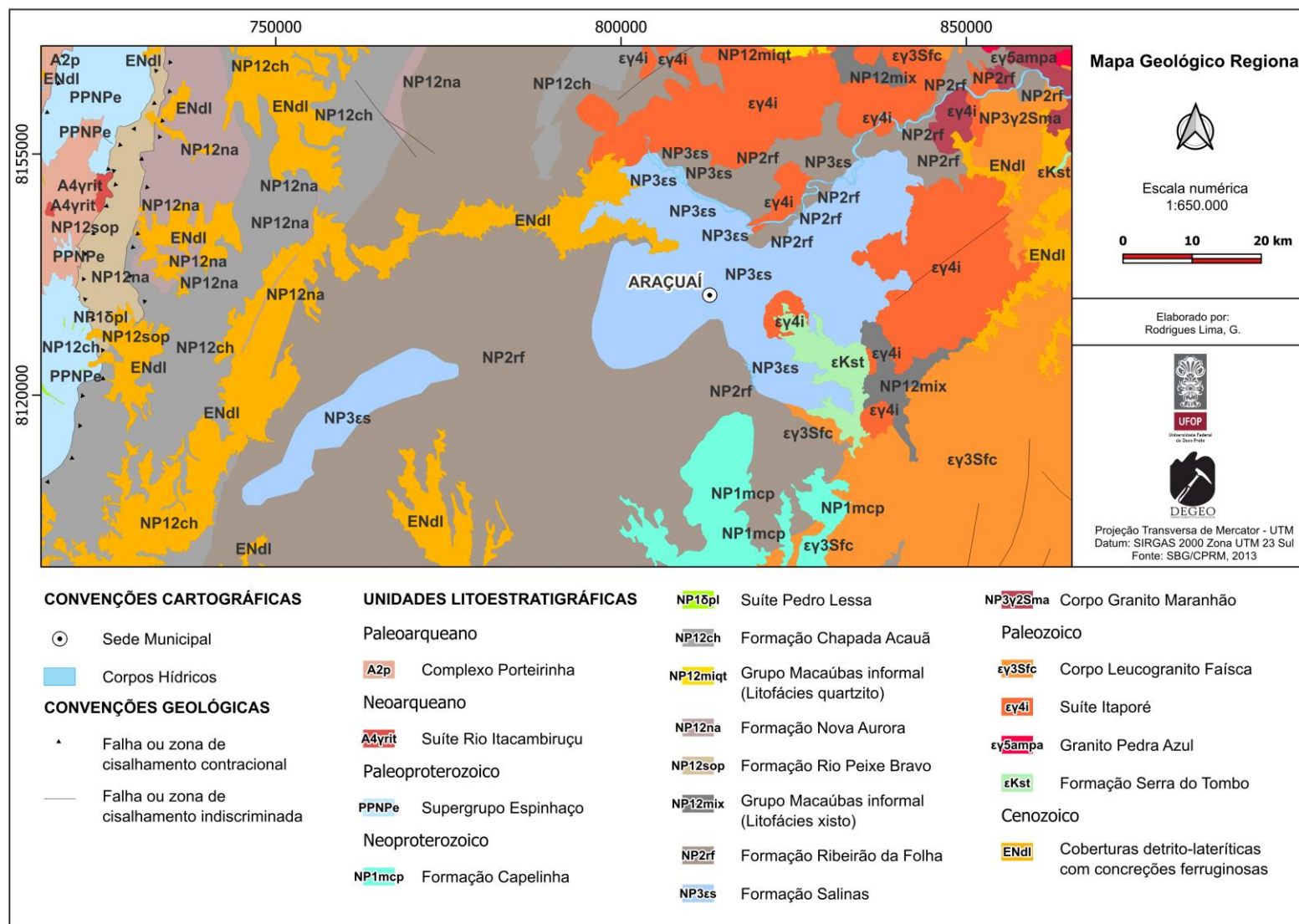
Conforme Alkmin *et al.*, (2006) e Noce *et al.*, (2007) o embasamento do Orógeno Araçuaí é formado por rochas de complexos metamórficos de idades Arqueanas e Paleoproterozóicas, as quais apresentam composição tonalítica a granodiorítica (TTG), com presença de greenstone belts, sequências supracrustais Paleoproterozóicas, e suítes graníticas. A orogênese Transamazônica (ca. 2,2-2,0 Ga) afetou os complexos metamórficos que posteriormente foram retrabalhados ao longo da Orogenia Brasileira.

A orogênese do Araçuaí é dividida em quatro estágios distintos que refletem sua evolução tectônica. O estágio pré-colisional, datado de 630-585 Ma, é marcado pela subducção da litosfera oceânica ativa e pela formação de arcos magmáticos cálcio-alcalinos continentais. Seguindo-se, o estágio sin-colisional (585-560 Ma) é caracterizado pelas interações das regiões

colisionais, definido pelo espessamento crustal "horizontal" e pela geração de magmas tipo-s formados em decorrência da fusão parcial do material crustal. O estágio tardi-colisional (545-525 Ma) apresenta a tectônica tangencial, com desenvolvimento de escapes laterais e geração de granitos tipo-S. Por fim, o estágio pós-colisional (530-480 Ma) é caracterizado pelo colapso gravitacional do orógeno, pelo plutonismo tipo-I e tipo-A, e pela exumação de rochas de alto grau (Alkmim *et al.*, 2006; Pedrosa-Soares *et al.*, 2011).

Pedrosa-Soares e Alkmim (2006), por meio de dados geocronológicos, descrevem múltiplos eventos de caráter extensional e/ou ígneo que antecederam o soerguimento do Orógeno Araçuaí. O primeiro evento ocorreu durante a transição do Riáciano para o Orosiriano (2,05 Ga), marcado pela nucleação do rifte Espinhaço, associado às deposições do Supergrupo Espinhaço, o segundo evento é representado pelo aulacógeno Paramirim, ocorrendo ao longo do Calimíniano – por volta de 1,51 Ga – caracterizado por sistemas aluviais e eólicos dos depósitos da Formação Tombador, o terceiro evento, durante o Esteniano (1,18 Ga), é marcado pela deposição de pacotes de sedimentos aluvionares, eólicos e marinhos da porção central e superior do Supergrupo Espinhaço, representando um rifte do tipo sag, o quarto evento, marcado pelo rifteamento local, culminou no surgimento do aulacógeno Sangha, com diques máficos de idade similar ao longo do cráton São Francisco, podendo estar correlacionados (Alkmim *et al.*, 2006), o quinto evento representa as intrusões de diques máficos relacionadas ao rifte Macaúbas, incluindo o Dique Pedro Lessa, com magmatismo máfico datado em cerca de 906 ± 2 Ma (Uhlein & Quemeneur, 2001.; Machado *et al.*, 1989), finalmente, o sexto evento, ao longo do Toniano-Criogeniano, marca a sedimentação das formações glaciogênicas do Grupo Macaúbas, com vulcânicos básicos subordinados de 850 Ma, e seus correspondentes do oeste do Congo, datando entre 900 e 740 Ma (Alkmim *et al.*, 2006).

Figura 7 - Mapa da geologia regional da área de estudo na escala 1:650.000.



Fonte: Rodrigues Lima (2026)

3.2 A Província Pegmatítica Oriental do Brasil

Conforme a interpretação de Pedrosa-Soares *et al.* (2011), o magmatismo no Orógeno Araçuaí, datado de aproximadamente 630 a 480 Ma, fundamenta a formação da Província Pegmatítica Oriental do Brasil. Este magmatismo é dividido em cinco supersuítas graníticas (G1 a G5), formadas ao longo de diferentes estágios da orogênese. A suíte G1, datada de 630 a 585 Ma, define o arco magmático pré-colisional, formada por tonalitos e granodioritos de natureza cálcio-alcalina, com feições máficas. A supersuíte G2 (585 a 560 Ma) representa a fase sin-colisional, a qual gerou granitos tipo-S, peraluminosos. A G3, com idade de cerca de 545 a 525 Ma, é constituída por leucogranitos de caráter peraluminoso, ricos em granadas e cordierita, originados ao longo da fase tardi-colisional. A suíte G4, com idade de cerca de 530 a 490 Ma, compreende os granitos tipo-S, de origem pós-colisional, que constituem a principal fonte dos pegmatitos da província, sendo importante para a extração de gemas, espodumênio e feldspato industrial. Por fim, também de origem pós-colisional, a suíte G5 é composta por granitos tipo-I e tipo-A, com composição cálcio-alcalina rica em potássio a alcalina, ou charnockíticos.

3.3 Local

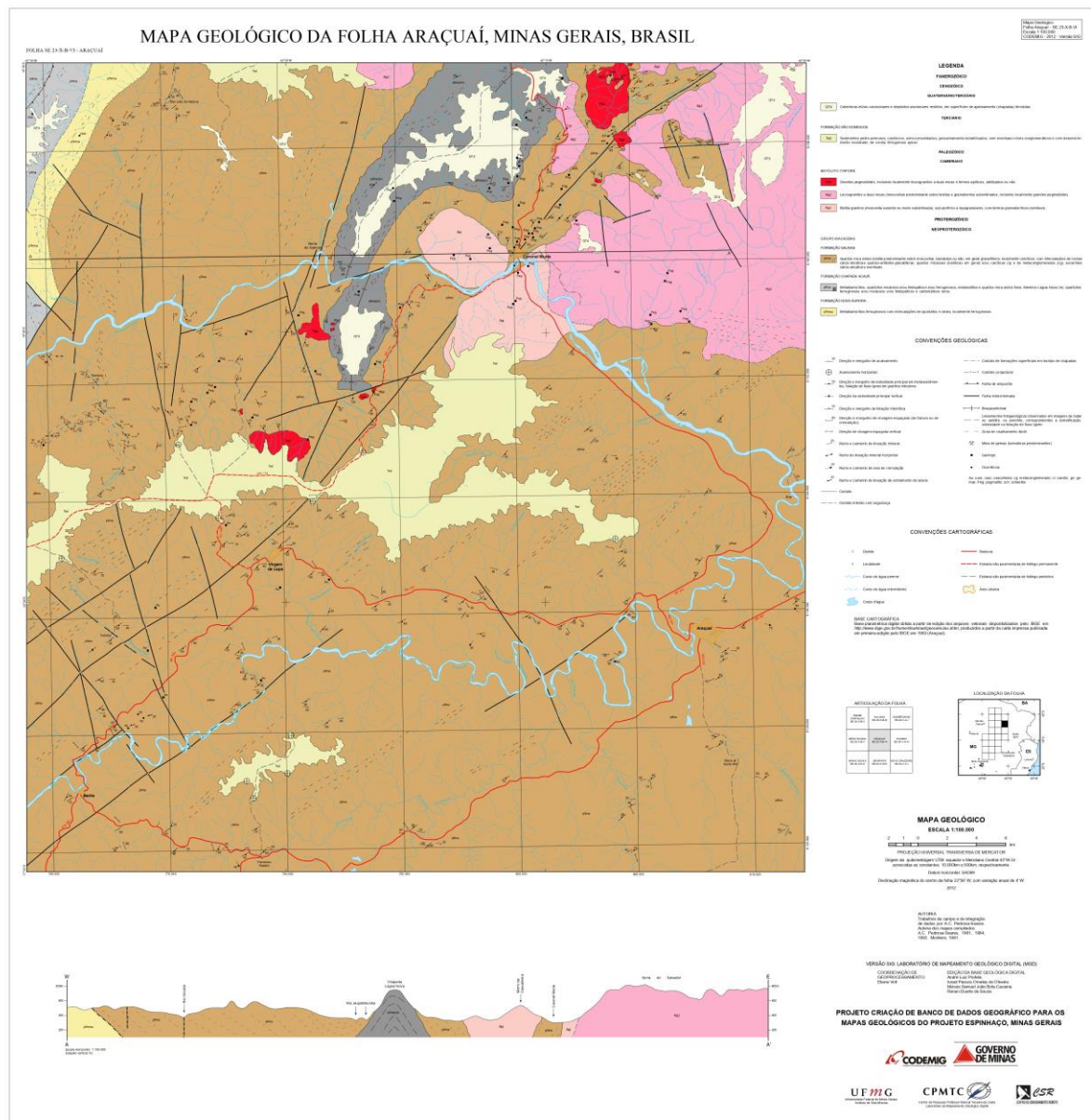
Representando o registro sedimentar da Bacia Macaúbas, o Grupo homônimo apresenta idade de deposição em torno de 900 Ma (Babinski *et al.*, 2007), associada a um ambiente de rifte com evolução para margem passiva (Uhlein *et al.*, 1999; Pedrosa-Soares *et al.*, 2007). O grupo é composto por formações pré-glaciais e glaciais, além de unidades distais, conforme descrito por Grossi-Sad *et al.* (1997) e Noce *et al.* (1997).

Conforme Pedrosa-Soares *et al.* (2007), o Grupo Macaúbas (FIG. 7), em sua base, é composto por formações associadas à fase de rifteamento, com depósitos fluviais e marinhos rasos, representados pelas unidades geológicas Duas Barras, Rio Peixe Bravo e Serra do Catuni. Sobre estas unidades, encontram-se as formações Nova Aurora e Chapada Acuã registrando as deposições glacio-marinha (Pedrosa-Soares *et al.*, 2007; Babinski *et al.*, 2005).

Acima das unidades descritas, encontra-se a Formação Salinas, que marca a transição do ambiente anterior para uma margem passiva, assinalando o encerramento da glaciação e o início da subsidência térmica da bacia (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001). Definida por Pinto *et al.* (1997), a formação registra a deposição transgressiva de margem passiva pós-glacial, sendo composta por uma sucessão de xistos, filitos, quartzitos e lentes de calcário. Adicionalmente, a

unidade inclui rochas vulcanossedimentares da fácies Ribeirão da Folha, com ocorrência de ofiolitos, basaltos metamorfizados, cherts, gabros, formações ferríferas bandadas (BIFs), plagiogranitos e rochas ultramáficas (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001). Durante os eventos de deformação e metamorfismo do orógeno, a Formação Salinas tornou-se uma das principais unidades hospedeiras dos granitos pós-colisionais das suítes G4 e G5 (Pedrosa-Soares *et al.*, 2011).

Figura 8 - Mapa Geológico da Folha Araçuaí/MG - SE.23-X-BVI.



Fonte: CODEMIG (2012).

3.4 Geoquímica dos Pegmatitos

A Província Pegmatítica Oriental do Brasil, situada no Orógeno Araçuaí, apresenta ampla variação mineralógica, controlada pela evolução da diferenciação do magma parental. Conforme interpretado por Viana *et al.* (2007), os pegmatitos da região exibem contrastes composicionais marcantes: as rochas das assembleias Ipé, Aci e Serra Cascalheira são compostas predominantemente por quartzo, feldspato alcalino e muscovita, com teores de lítio variando entre 0,07 e 0,35 wt%. Em comparação, os leucogranitos dos complexos Cruzeiro e Rocinha são enriquecidos em turmalina, berilo, lepidolita e espodumênio, apresentando teores de lítio na muscovita entre 0,63 e 0,80 wt%.

Em função disso, as rochas que apresentam muscovitas com maiores teores de Li indicam magmas mais diferenciados e enriquecidos em elementos incompatíveis. Sá (1977) descreve que os pegmatitos ricos em lítio da região de Araçuaí–Itinga são constituídos por microclínio, quartzo, espodumênio, albita e muscovita, apresentando como minerais acessórios berilo, turmalinas em suas diversas variedades, petalita, ambligonita, lepidolita, polucita, placas de tantalita-columbita, grãos de esfalerita e pirita. O autor ainda destaca que a polucita ocorre associada aos minerais de lítio, sendo um importante indicador da presença de céσιο (Cs) no magma residual.

A razão K/Rb em função do teor de Cs na muscovita constitui um importante indicador do grau de diferenciação magmática ao longo da evolução dos pegmatitos (Viana *et al.*, 2007; Černý *et al.*, 1985; Jolliff *et al.*, 1992; Černý, 1991). Segundo Jolliff *et al.* (1992), os elementos-traço presentes nas muscovitas tendem a se agrupar, embora em alguns casos apresentem dispersão intra-pegmatítica. Em pegmatitos derivados de magmas graníticos por fracionamento, as micas exibem enriquecimento progressivo em Li, Rb, Cs e F, acompanhado por decréscimo nos teores de Mg, Ti e na razão K/Rb, das zonas internas para as zonas externas. As análises geoquímicas realizadas por Sá (1977), indicam que a presença de Rb, Li, Cs, e Zn nos xistos diminui conforme distanciam dos corpos pegmatíticos.

Viana *et al.* (2007), por meio de análises de muscovitas de origem pegmatítica, demonstra que elementos-traço como boro (B), gálio (Ga), ítrio (Y), nióbio (Nb) e zinco (Zn) apresentam relação inversa com a razão K/Rb, sendo considerados bons indicadores do grau de diferenciação magmática e do potencial econômico para mineralizações de lítio e gemas. A autora destaca ainda que o Ga e o Y são os elementos mais relevantes, estando associados a pegmatitos ricos em turmalina e espodumênio. O Zn e o Nb também atuam como indicadores desse processo de diferenciação, ocorrendo preferencialmente em magmas mais evoluídos.

Por fim, elementos maiores e traços, bem como sistemas isotópicos como Lu–Hf em zircões e Sm–Nd e Rb–Sr, são fundamentais para a compreensão dos processos tectônicos e magmáticos associados a ambientes acima de zonas de subducção, no contexto da orogenia colisional, incluindo eventos pré- e sin-colisionais, tais como reciclagem crustal e interação crosta–manto durante a evolução do Orógeno Araçuaí (Viana *et al.*, 2007).

3.4.1 Classificação dos pegmatitos

Para uma melhor compreensão dos pegmatitos, diversos estudos realizaram a interpretação da rocha e a classificação em diferentes grupos. Em sua tese de doutorado de 1977, Sá compilou trabalhos de Fersman (1931), Ginsburg (1960), Varlamoff (1948-1971) e Nedumov (TAB. 4), baseando-se nas fases evolutivas dos pegmatitos, suas assembleias minerais e a temperatura. Černý e Ercit (2005), em seu artigo *The Classification of Granitic Pegmatites Revisited*, por meio da geoquímica dos pegmatitos graníticos, expõem uma classificação petrogenética, subdividindo-a em classes, subclasses, tipos e subtipos. Conforme simplificado por Foca (2025), a TAB. 5 demonstra três tipos de família: a LCT (Lítio, Césio e Tântalo), caracterizadas por baixo teor de Nb e sendo rochas peraluminosas, derivadas de rochas supracrustais de grau superior a médio, a NYF (Nióbio, Ítrio e Flúor), que são subaluminosas e metaluminosas, associadas à granulitos da crosta média a inferior, e por último, o tipo misto, que representa um híbrido de LCT e NYF, variando de subaluminoso a ligeiramente peraluminoso. Com foco na região de Araçuaí, Viana *et al.* (2007), em seu artigo, compilou a mineralogia de seis suítes pegmatíticas encontradas nas regiões de Araçuaí e Governador Valadares, correlacionando-as às condições de metamorfismo e ao tipo de pegmatito (TAB. 6).

Tabela 4 - Classificações comparativas de pegmatitos

	FASE		B	C	D	E	F	G	H		
	TEMPERATURA		800°C	700°C	600°C		500°C		400°C		
	TIPOS		1	2	3	4	5	6	7,8,9		
FERSMAN (1931)	NOME		PEGMATITOS COMUNS COM ALANITA E MONAZITA	PEGMATITOS COM ELEMENTOS DE TERRAS RARAS	PEGMATITOS COM MINERAIS DE BORO E FLUOR	PEGMATITOS COM MINERAIS DE FLUOR E BERILIO	PEGMATITOS COM MINERAIS DE SÓDIO E LÍTIO	PEGMATITOS COM FOSFATOS DE MANGANÊS	FASE PNEUMATOLÍTICA HIDROTHERMAL VEIOS COM W, Au, As		
	MINERAIS (PRINCIPAIS)		PLAGIOCLÁSIO, MICROCLINA, BIOTITA, QUARTZO, MAIS RARAMENTE TURMALINA NEGRA.	MICROCLINA, QUARTZO, BIOTITA, TURMALINA NEGRA, ÀS VÉZES MAGNETITA; PODE CONTER MUSCOVITA	MICROCLINA, QUARTZO, MUSCOVITA, TURMALINA NEGRA	MICROCLINA, QUARTZO, MUSCOVITA, BERILO. TURMALINA NEGRA MENOS ABUNDANTE QUE NO TIPO 3.	MICROCLINA, QUARTZO, MUSCOVITA, ALBITA (SUBSTITUINDO OS MINERAIS) ESPODUMÊNIO, LEPIDOLITA, TURMALINAS DE COR.	MICROCLINA, QUARTZO, MUSCOVITA, COM FOSFATOS DE FERRO-MANGANÊS E LÍTIO.	- MICROCLINA, MUSCOVITA, QUARTZO, ALBITA. - PLAGIOCLÁSIO, ALBITA, MUSCOVITA, QUARTZO, SULFETOS.		
GINSBURG (1960)	TIPOS		1	2	3	4	5	6	7	8	
	NOME		PEGMATITOS DE CRISTALIZAÇÃO PRIMÁRIA (SEM SUBSTITUIÇÃO)			TIPOS DE TRANSIÇÃO	SUBSTITUIÇÃO INTENSA POR ALBITA, LEPIDOLITA, ETC, COM ENRIQUECIMENTO PROGRESSIVO DE LI, RD, CS				
	CRISTALIZAÇÃO	I Co									
		II K									
		III Li									
	SUBSTITUIÇÃO	IV No									
		V K									
		VI K-Li									
	MINERAIS E ELEMENTOS		TERRAS RARAS								
	CARACTERÍSTICOS		MUSCOVITA								
BERILO											
CASSITERITA, TANTALITA - COLUMBITA											
LÍTIO											
		CÉSIO									
VARLAMOFF CLASSIFICAÇÃO DOS PEGMATITOS DO CENTRO E OESTE DA ÁFRICA (1948-1971)	ESPÉCIES		I - PEGMATITOS COM BIOTITA		II - COM DUAS MÍCAS	III - PEGMATITOS COM MUSCOVITA					IV - VEIOS DE QUARTZO COM MUSCOVITA
	TIPOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	MINERAIS CARACTERÍSTICOS		PEGMATITOS COM BIOTITA.	PEGMATITOS COM BIOTITA E TURMALINA, ESTRUTURAS GRÁFICAS DE QUARTZO E FELDSPATO.	PEGMATITOS COM MUSCOVITA E TURMALINA.	PEGMATITOS COM MUSCOVITA E TA.	PEGMATITOS COM MUSCOVITA E TA.	PEGMATITOS ZONADOS FREQUENTEMENTE COM NÚCLEO QUARTZO, AMBLIGONITA, ESPODUMÊNIO, BERILO E ALGUMA CASSITERITA, TANTALITA COLUMBITA E MICROLITA.	PEGMATITOS FORTEMENTE ALBITIZADOS C/ ESPODUMÊNIO, MUSCOVITA (LEPIDOLITA) BERILO, CASSITERITA E TANTALITA-COLUMBITA.	VEIOS DE QUARTZO COM CRISTAIS DE MICROCLINA ALBITIZADOS, COM MUSCOVITA E CASSITERITA.	VEIOS DE QUARTZO; SCHEELITA, FERBERITA (CASSITERITA) PASSANDO A VEIOS DE QUARTZO COM MUSCOVITA, CASSITERITA (WOLFRAMITA)
NEDUMOV CLASSIFICAÇÃO DOS PEGMATITOS DA URSS (1964)	TIPOS		I		II	III	IV	V	VI		
	MINERAIS CARACTERÍSTICOS		VEIOS DE QUARTZO - PLAGIOCLÁSIO COM QUANTIDADES VARIÁVEIS DE MICROCLINA COM OU SEM BIOTITA TURMALINA.		VEIOS DE QUARTZO, PLAGIOCLÁSIO, MICROCLINA E BIOTITA, MUSCOVITA, TURMALINA.	VEIOS DE QUARTZO, PLAGIOCLÁSIO, ALBITA, MUSCOVITA E TURMALINA, BERILO E TANTALITO-NIOBATO.	VEIOS COM ALBITA, ESPODUMÊNIO - QUARTZO E PEGMATITOS COM ESPODUMÊNIO - ALBITA - MICROCLINA - QUARTZO - BERILO, MINERAIS DE LI, CS, TO - ND, etc.	VEIOS COM ESPODUMÊNIO - ALBITA - QUARTZO E MICROCLINA, MUSCOVITA, CASSITERITA, TURMALINA, TANTALITO-NIOBATO, BERILO E OUTROS MINERAIS.	ESSENCIALMENTE VEIOS DE ALBITA COM QUARTZO E TURMALINA.		
										- VEIOS DE QUARTZO COM MUSCOVITA OU TURMALINA COM CASSITERITA E BERILO. VEIOS DE QUARTZO.	

SEGUNDO SCHNEIDERHÖHN (1961) E VARLAMOFF (1954-1972), MODIFICADO

Tabela 5 - Sistema familiar de classificação petrogenética de pegmatitos graníticos

Família	Subclasse dominante de pegmatitos	Assinatura Geoquímica	Composição em massa de pegmatitos	Granitos associados	Composição em massa de granitos	Litologias fonte
LCT	REL-Li MI-Li	Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ga, Ta>Nb, (B, P, F)	peraluminoso a subaluminoso	(sinorogênico a) orogênico tardio (a anorogênico): largamente heterogêneo	peraluminoso, tipos S, I ou misto S+I	rochas supracrustais da crosta superior à média não esgotadas e gnaisses de embasamento
NYF	REL-REE MI-REE	Nb>Ta, Ti, Y, Se, REE, Zr, U, Th, F	subaluminoso a metaluminoso (a subalcalino)	(sin-, tardio, pós-), a principalmente anorogênico; quase-homogêneo	(peraluminoso a) subaluminoso e metaluminoso; tipos A e I	granulitos da crosta média a inferior esgotados, granitos juvenis, crosta metassomatizada do manto
Misto	Híbridos LCT e NYF	misto	(metaluminoso a) moderadamente peraluminoso	(pós-orogênico a) anorogênico; heterogêneo	subaluminoso a ligeiramente peraluminoso	protólitos mistos ou assimilação de rochas supracrustais por granitos NYF

Fonte: Foca (2025); Adaptado Cerny e Ercit, (2005)

Tabela 6 - Mineralogia de acordo com o zoneamento interno e a classificação dos pegmatitos estudados (GV: Governador Valadares AR: Araçuaí)

Região	Pegmatito	Zona de borda	Zona de parede	Zona intermediária	Núcleo	Bolsões	Rochas encaixantes/ condições metamórficas	Tipo de pegmatito
GV	Aci	quartzo, muscovita, turmalina negra	Intercrescimentos quartzo - feldspato-K, muscovita, albita	quartzo - feldspato-K, muscovita, quartzo, berilo	quartzo leitoso	lepidolita, albita, muscovita	Xisto e gnaiss	Gema Simples
	Cruzeiro	quartzo, muscovita, turmalina negra, granada	Intercrescimentos quartzo - feldspato-K, albita, muscovita	quartzo, feldspato-K, muscovita, lepidolita, turmalina rosa e verde, berilo, cassiterita, niobotantalita	quartzo leitoso, muscovita	lepidolita, albita, turmalina rosa e verde, muscovita, berilo alterado	Xisto e quartzito 4,5–5,0 kbar 530–650 °C (e.g., Talarico & Pereira 1997)	Gema portadora de turmalina Complexo
	Ipê	quartzo, muscovita, intercrescimento de biotita, granada, turmalina negra	Intercrescimentos quartzo - feldspato-K, muscovita, albita	feldspato-K, quartzo, muscovita, berilo, columbita/tantalita	quartzo hialino/leitoso/rosa	quartzo, muscovita, albita, berilo, ametista	Xisto 4,5–5,0 kbar 530–650 °C (e.g., Talarico e Pereira 1997)	Portador de berilo Simples
Ar	Rocinha	quartzo, muscovita, turmalina verde, albita	Intercrescimentos quartzo - feldspato-K, muscovita, albita	feldspato-K, muscovita, quartzo, turmalina verde/rosa/bicolor, morganita, água- marinha alterada, albita	quartzo leitoso, turmalina rosa, lepidolita, muscovita	quartzo, albita, lepidolita, turmalina bicolor e verde	Xisto 2,5–5,5 kbar 500–740 °C (e.g., Costa 1989)	Gema portadora de turmalina Complexo
	Serra Cascalheira	quartzo, turmalina negra, granada, biotita	Intercrescimentos quartzo - feldspato-K, muscovita, albita	feldspato-K, quartzo, muscovita, berilo, albita	quartzo hialino/leitoso/rosa	quartzo, muscovita, albita alterada, berilo, ametista	Gnaiss granítico	Portador de berilo Simples
	Barreiro	quartzo, muscovita negra, biotita, hematita	Intercrescimentos quartzo - feldspato-K, muscovita, hematita	quartzo - feldspato-K, muscovita, berilo, fluorapatita, topázio, albita	quartzo hialino e leitoso	quartzo, feldspato- K parcialmente substituído por muscovita, berilo, albita	Granito	Portador de berilo-topázio- fluorapatita Simples

Fonte: Viana *et al.* (2007)

3.5 Pegmatitos da Mina da Cachoeira

No artigo 'Uncommon Nb-tantalate from the Cachoeira mine, Araçuaí pegmatite district (Minas Gerais)', Dias e Chaves (2015) focaram em cristais negros tabulares presentes nas rochas locais, os quais se assemelhavam à columbita-tantalita. A rocha em questão é descrita como um corpo rico em espodumênio, com microclina pertítica, albita, quartzo e muscovita, representando cerca de 95% do volume dos corpos, sendo 23% destes compostos por espodumênio. As análises químicas das 27 amostras demonstram que 42% são compostas de columbita-(Fe), 19% de tantalita-(Fe) e 3% de columbita-(Mn). O estudo indica que os valores de Ta e Nb nas rochas locais são expressivamente variáveis, ao passo que os valores de Sn não apresentam grande expressividade, sendo assim, a elevada presença de óxido de estanho constitui um dos traços indicadores de óxidos de Ta-Nb da Mina da Cachoeira. Por fim, Dias e Chaves (2015) descrevem um novo mineral para a região, a ixiolita, associada a teores elevados de Sn.

Por meio de análises de MEV, EDS e DRX, Santos *et al.* (2024) buscaram caracterizar o corpo rochoso da Mina da Cachoeira, onde o MEV e o EDS foram utilizados para compreender a morfologia e a distribuição do tamanho das partículas. Com o EDS, foi possível identificar elementos como ferro (Fe) e enxofre (S), além de sódio (Na), cálcio (Ca) e potássio (K), indicados como formadores do feldspato. A partir da difração de raios X, foram identificados os seguintes minerais e seus respectivos teores: espodumênio (33-76%), quartzo (1-12%), pirita (10-18%), petalita (9-13%) e biotita (9-13%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composição Elementar (ICP)

Os dados geoquímicos são de grande importância para a compreensão da composição de um corpo rochoso. Os dados geoquímicos auxiliam na caracterização composicional e, quando integrados às informações mineralógicas e geológicas, podem contribuir para a interpretação da evolução da rocha e uma possível história de sua origem. Dentro deste contexto, o *ICP*, método que realiza a leitura simultânea de diversos elementos, foi empregado para a detecção dos elementos no pegmatito granítico. Foram obtidos 56 elementos na amostra, dentre os quais 33 apresentavam censura, representando 59% do total.

Os dados foram fornecidos em formato bruto, sendo necessária a realização de tratamento. Embora a proporção calculada tenha sido enquadrada na terceira faixa proposta pela EPA, os valores abaixo do limite de detecção foram substituídos por LD/2 para fins exclusivamente gráficos. Isso se deve ao fato de que todos os dados presentes são importantes, e a aplicação dos demais métodos resultaria na exclusão de informações pertinentes. Na TAB. 7 estão os dados brutos, enquanto na TAB. 8 estão os dados pós-tratamento. Para a apresentação dos resultados, os elementos foram agrupados segundo os critérios de Rollinson (1993). Os elementos maiores, definidos como aqueles com abundância superior a 1% da amostra, foram convertidos para percentagem de peso de óxidos (wt. %) para fins de classificação petrológica. Este grupo inclui os dez óxidos padrão e o Li_2O . Os elementos terras raras (ETR) e o Ítrio (Y) foram submetidos à normalização pelo Condrito de Boynton (1984) para a construção dos diagramas de Masuda-Coryell. Os demais elementos foram mantidos em ppm e discutidos como elementos traço de interesse. As conversões para óxidos encontram-se na TAB. 9, enquanto as normalizações dos elementos Terras Raras estão presentes na TAB. 10.

Tabela 7 - Dados Brutos dos Elementos obtidos por ICP

Elemento	Unidade	SMP Bruto (Amostra)	STD Bruto (Padrão)	Status Censura
Ag	ppm	<1.0	1.0	Censurado (SMP)
Al	ppm	91440.0	79873.0	Detectado
As	ppm	<30.0	<30.0	Censurado (SMP e STD)
B	ppm	<1000	<1000	Censurado (SMP e STD)
Ba	ppm	<10.0	31.0	Censurado (SMP)
Be	ppm	193.0	184.0	Detectado
Bi	ppm	5.3	<0.5	Censurado (STD)
Ca	ppm	<1000.0	3510.0	Censurado (SMP)
Cd	ppm	<10.0	<10.0	Censurado (SMP e STD)
Ce	ppm	0.6	0.8	Detectado
Co	ppm	<10.0	<10.0	Censurado (SMP e STD)
Cr	ppm	<20.0	147.0	Censurado (SMP)
Cs	ppm	30.2	28.8	Detectado
Cu	ppm	20.0	27.0	Detectado
Dy	ppm	<0.05	0.22	Censurado (SMP)
Er	ppm	<0.05	0.06	Censurado (SMP)
Eu	ppm	<0.05	0.06	Censurado (SMP)
Fe	ppm	9725.0	8998.0	Detectado
Ga	ppm	48.0	26.0	Detectado
Gd	ppm	<0.05	0.19	Censurado (SMP)
Ge	ppm	4.0	4.0	Detectado
Hf	ppm	<2.0	<2.0	Censurado (SMP e STD)
Ho	ppm	<0.05	<0.05	Censurado (SMP e STD)
In	ppm	<0.2	<0.2	Censurado (SMP e STD)
K	ppm	4065.0	47019.0	Detectado
La	ppm	0.4	0.7	Detectado
Li	ppm	14932.0	2013.0	Detectado
Lu	ppm	<0.05	<0.05	Censurado (SMP e STD)
Mg	ppm	<100.0	1630.0	Censurado (SMP)
Mn	ppm	480.0	1159.0	Detectado
Mo	ppm	<3.0	<3.0	Censurado (SMP e STD)
Nb	ppm	61.0	12.0	Detectado
Nd	ppm	0.2	0.7	Detectado
Ni	ppm	<10.0	20.0	Censurado (SMP)
P	ppm	565.0	4174.0	Detectado
Pb	ppm	<20.0	34.0	Censurado (SMP)
Pr	ppm	0.07	0.29	Detectado
Rb	ppm	132.0	1044.0	Detectado
Sb	ppm	<0.5	1.0	Censurado (SMP)
Sc	ppm	<5.0	<5.0	Censurado (SMP e STD)
Sm	ppm	<0.1	0.3	Censurado (SMP)
Sn	ppm	53.0	24.0	Detectado
Sr	ppm	<15.0	68.0	Censurado (SMP)
Ta	ppm	<10.0	<10.0	Censurado (SMP e STD)
Tb	ppm	<0.05	<0.05	Censurado (SMP e STD)
Th	ppm	0.7	0.4	Detectado
Ti	ppm	<100.0	<100.0	Censurado (SMP e STD)
Tl	ppm	<0.5	5.5	Censurado (SMP)
Tm	ppm	<0.05	<0.05	Censurado (SMP e STD)
U	ppm	3.08	2.92	Detectado
V	ppm	<10.0	<10.0	Censurado (SMP e STD)
W	ppm	<100.0	<100.0	Censurado (SMP e STD)
Y	ppm	0.14	1.02	Detectado
Yb	ppm	<0.1	<0.1	Censurado (SMP e STD)
Zn	ppm	<50.0	97.0	Censurado (SMP)
Zr	ppm	2.9	10.2	Detectado

Tabela 8 - Dados de ICP Pós-tratamento

Elemento	SMP Tratado (Amostra)	STD Tratado (Padrão)
Ag	0.5	1
Al	91440	79873
As	15	30
B	500	1000
Ba	5	31
Be	193	184
Bi	5.3	0.5
Ca	500	3510
Cd	5	10
Ce	0.6	0.8
Co	5	10
Cr	10	147
Cs	30.2	28.8
Cu	20	27
Dy	0.025	0.22
Er	0.025	0.06
Eu	0.025	0.06
Fe	9725	8998
Ga	48	26
Gd	0.025	0.19
Ge	4	4
Hf	1	2
Ho	0.025	0.05
In	0.1	0.2
K	4065	47019
La	0.4	0.7
Li	14932	2013
Lu	0.025	0.05
Mg	50	1630
Mn	480	1159
Mo	1.5	3
Nb	61	12
Nd	0.2	0.7
Ni	5	20
P	565	4174
Pb	10	34
Pr	0.07	0.29
Rb	132	1044
Sb	0.25	1
Sc	2.5	5
Sm	0.05	0.3
Sn	53	24
Sr	7.5	68
Ta	5	10
Tb	0.025	0.05
Th	0.7	0.4
Ti	50	100
Tl	0.25	5.5
Tm	0.025	0.05
U	3.08	2.92
V	5	10
W	50	100
Y	0.14	1.02
Yb	0.05	0.1
Zn	25	97
Zr	2.9	10.2

4.1.1 Elementos Maiores

Os elementos maiores são os principais elementos que compõem a rocha, dando o controle mineralógico essencial do pegmatito, atrelando-se, então, às propriedades do magma. Conforme supracitado, os elementos convertidos em óxidos estão expostos na TAB. 9.

Tabela 9 - Conversão de Elemento para Óxido (wt%) - Elementos Maiores

Elemento	Óxido	Massa molar do elemento (g/mol)	Conc. Elem. (ppm)	Massa molar do óxido (g/mol)	Nº átomos no óxido	Fator de Conversão	Óxido (wt%)
Si	SiO ₂	28.090	*	60.090	1	2.1392	*
Ti	TiO ₂	47.870	50.00	79.870	1	1.6685	0.0083
Al	Al ₂ O ₃	26.980	91,440.00	101.960	2	1.8895	17.2780
Fe	Fe ₂ O ₃ (total)	55.850	9,725.00	159.690	2	1.4296	1.3903
Mn	MnO	54.940	480.00	70.940	1	1.2912	0.0620
Mg	MgO	24.310	50.00	40.310	1	1.6582	0.0083
Ca	CaO	40.080	500.00	56.080	1	1.3992	0.0700
Na	Na ₂ O	22.990	*	61.980	2	1.3480	*
K	K ₂ O	39.100	4,065.00	94.200	2	1.2046	0.4897
P	P ₂ O ₅	30.970	565.00	141.940	2	2.2916	0.1295
Li	Li ₂ O	6.941	14,932.00	29.882	2	2.1526	3.2142

* Elementos não reportado pelo laboratório que realizou a amostragem.

Observando os resultados, nota-se que somente 3 elementos apresentaram valores significativos para serem considerados maiores, aqueles com teores iguais ou maiores que 1%. Vejamos, então, que os elementos maiores foram os óxidos de alumínio (Al), ferro (Fe) e lítio (Li), com porcentagens 17,28%, 1,39% e 3,21%, respectivamente, apresentando soma total de 21,88%. Os demais elementos (Ti - titânio, Mn - manganês, Mg - magnésio, Ca - cálcio, K - potássio e P - fósforo) apresentaram valores menores e não podem ser considerados maiores, indo para o âmbito dos elementos traços, representando somente 0,77% da amostra. A soma total dos óxidos é de 22,65%, em decorrência da ausência dos óxidos de sódio e silício, a soma final encontra-se incompleta. A presença de Na e Si na amostra foi inferida a partir da identificação de fases minerais que contêm esses elementos, especialmente albita, quartzo e espodumênio. Estes elementos, por apresentarem limitações analíticas por ICP, não foram reportados pelos métodos analíticos aplicados pelo laboratório. O Si sofre volatilização durante a preparação da amostra por meio do uso de ácidos para a quebra de cadeias Si-O (Arslan, 2024). No caso do sódio, por ser um elemento muito presente na natureza e nos ambientes, sua análise é dificultosa. Por ser um elemento facilmente ionizável, sua alta concentração pode interferir nos resultados dos demais elementos (Arslan, 2024).

4.1.2 Elementos Terras Raras (ETR)

Para os elementos terras raras, foram seguidas também as recomendações do livro de Rollinson (1993), o qual indica a normalização dos valores de ETR por meio do condrito de Boynton (1984). A FIG. 10 expõe os dados tratados com LD/2 comparados com os valores de referência do pegmatito antes da normalização. Os dados normalizados estão expostos na TAB. 9 e FIG. 10.

Figura 9 - Gráfico de comparação multielementar ETR - Antes da Normalização.

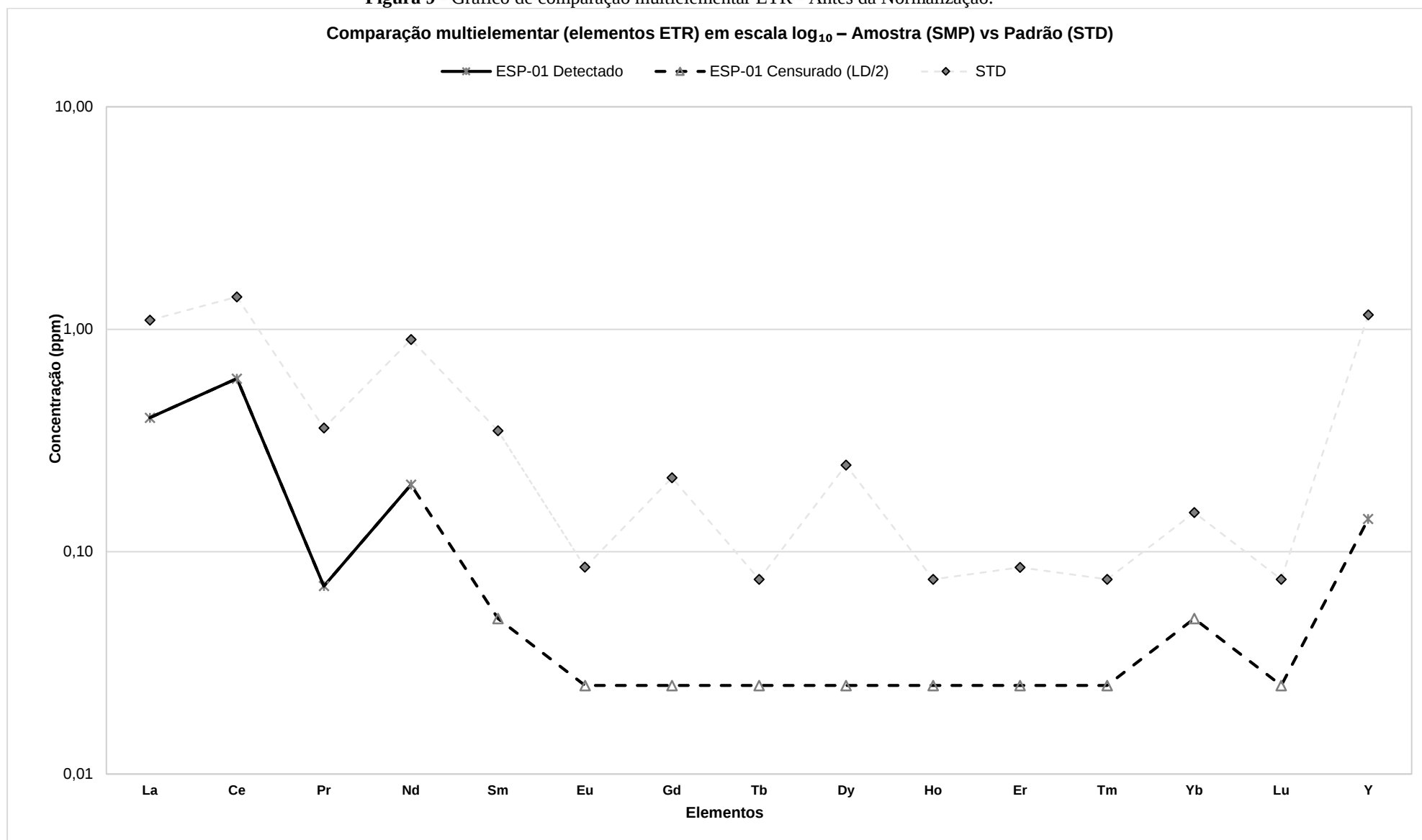
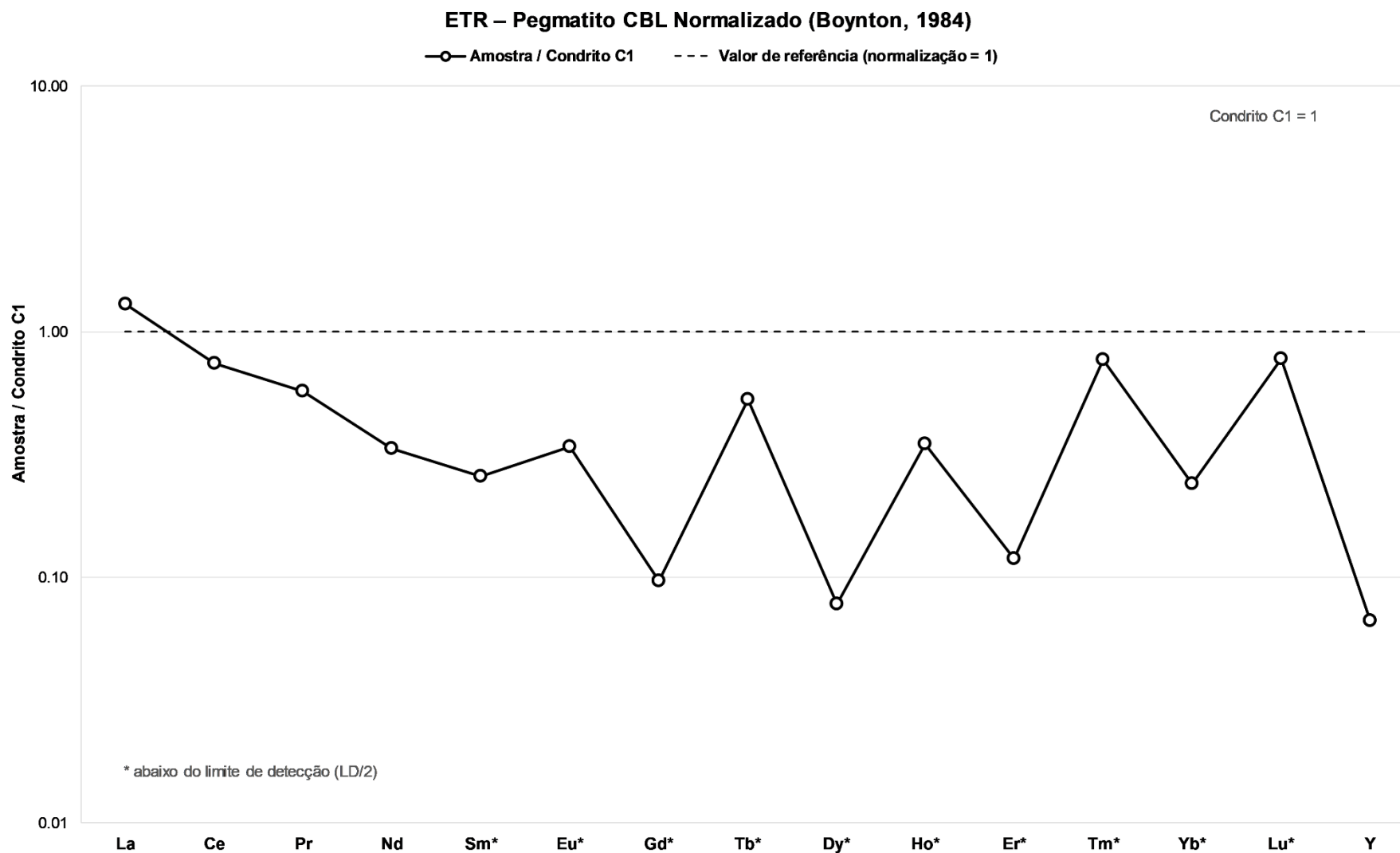


Tabela 10 - ETR + Y — Normalização por Condrito

Elemento	Conc. (ppm) ← ICP → Óxidos	Condrito C1 (ppm)	Norm / Condrito
La	0.400	0.3100	1.290
Ce	0.600	0.8080	0.743
Pr	0.070	0.1220	0.574
Nd	0.200	0.6000	0.333
Sm	0.050	0.1950	0.256
Eu	0.025	0.0735	0.340
Gd	0.025	0.2590	0.097
Tb	0.025	0.0474	0.527
Dy	0.025	0.3220	0.078
Ho	0.025	0.0718	0.348
Er	0.025	0.2100	0.119
Tm	0.025	0.0324	0.772
Yb	0.050	0.2090	0.239
Lu	0.025	0.0322	0.776
Y	0.140	2.1000	0.067

Figura 10 - Padrão de elementos de terras raras (ETR) da amostra ESP-01 (Pegmatito CBL) normalizado pelo condrito C1 de Boynton (1984). Asterisco (*) indica elementos com concentração abaixo do limite de detecção analítico, representados pelo valor LD/2 (Censurado).

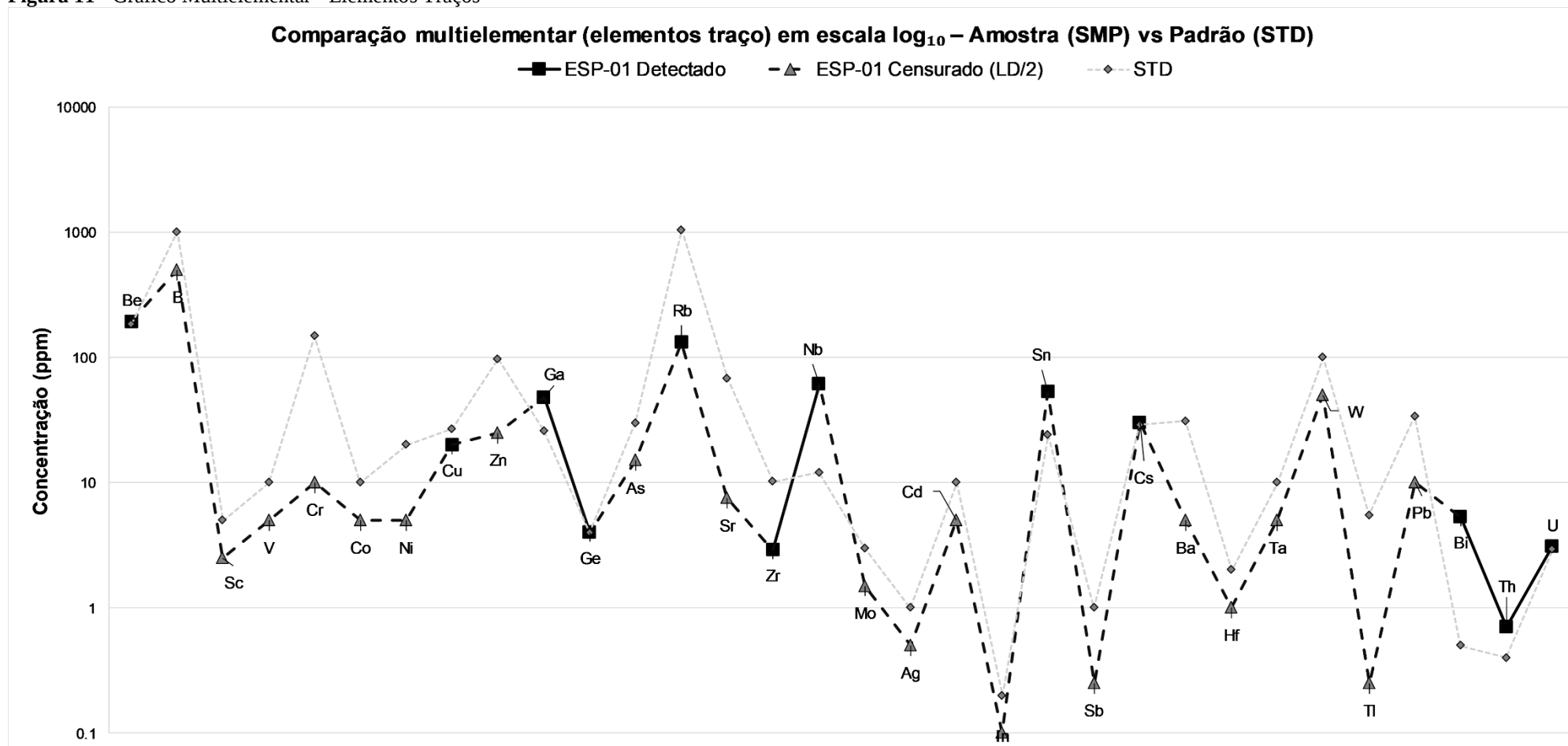


A análise multielementar da amostra da Mina da Cachoeira (FIG. 10) revela que as concentrações dos Elementos Terras Raras e do ítrio (Y) situam-se abaixo dos valores da amostra de referência. Visando uma melhor compreensão destes valores, o Diagrama de Masuda-Coryell (FIG. 11), normalizado pelo Condrito C1 de Boynton (1984), evidencia um padrão de empobrecimento geral, onde somente o lantânio (La) apresenta enriquecimento relativo ($\text{Norm/Condrito} = 1,29$), enquanto os demais ETR registram valores inferiores à unidade. O ítrio destaca-se como o elemento de menor valor normalizado ($\text{Norm/Condrito} = 0,067$). Vale ressaltar que parte dos elementos, como Tb, Dy, Ho, Er, Tm e Lu, encontra-se abaixo do limite de detecção analítico, sendo representados pelo valor LD/2 (TAB. 10).

4.1.3 Elementos Traços

Os elementos-traço são elementos químicos presentes em baixas concentrações na rocha. Em certas ocasiões, estes elementos formam minerais próprios, porém, comumente, substituem elementos maiores na estrutura cristalina dos minerais que compõem a rocha. Dessa forma, a compreensão dos elementos traços torna-se fundamental para o entendimento da petrologia do corpo rochoso, auxiliando na identificação mineralógica e na interpretação da evolução magmática. Os elementos traços do pegmatito estudado são apresentados na TAB. 7 com os valores brutos. Por outro lado, os valores tratados conforme os critérios da EPA, com substituição dos dados abaixo do limite de detecção pelo valor LD/2, constam na TAB. 8. Para uma melhor visualização do comportamento deste grupo de elementos, os dados foram plotados na FIG. 11.

Figura 11 - Gráfico Multielementar - Elementos Traços



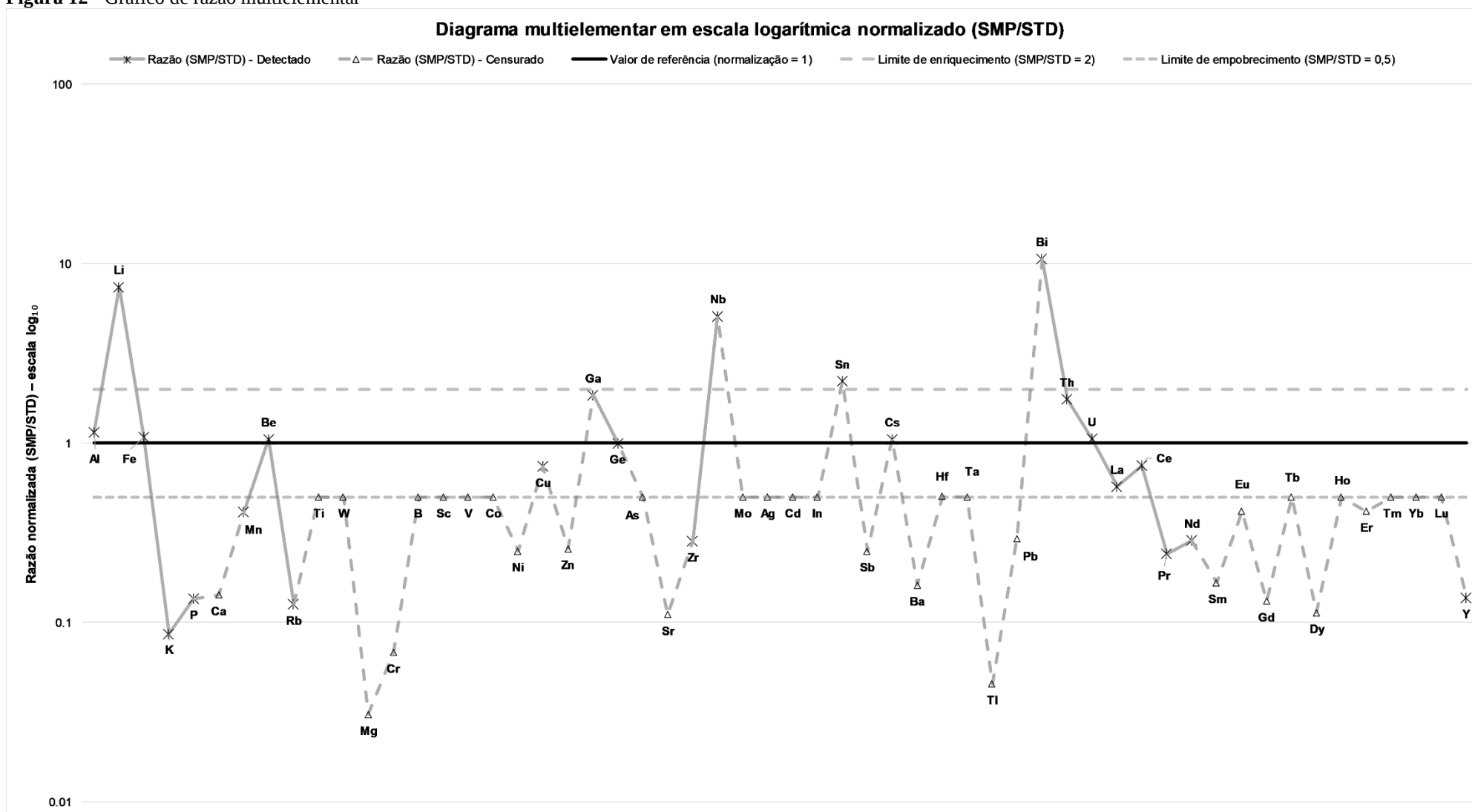
Os dados expostos no gráfico demonstram um comportamento variado na composição elementar do pegmatito. Dentre os 32 elementos traços analisados, 20 encontram-se abaixo do limite de detecção analítico, sendo representados pelo valor LD/2. Dentre os elementos efetivamente detectados, nota-se que a maioria apresenta valores próximos ao do padrão de referência ou superiores aos reportados para o STD, sendo eles o berílio (Be), gálio (Ga), germânio (Ge), nióbio (Nb), estanho (Sn), célio (Cs), bismuto (Bi), tório (Th) e urânio (U). Os demais elementos detectados, como cobre (Cu), zircônio (Zr) e rubídio (Rb), apresentam valores menores em relação ao padrão de referência.

4.1.4 Análise Multielementar dos Dados de ICP-MS e ICP-OES

Este tópico integra os resultados apresentados anteriormente com o objetivo de avaliar a composição e possíveis indicadores de evolução do pegmatito, por meio da geoquímica, e compreender as possíveis origens, a evolução, o grau de fracionamento e a composição do pegmatito da Mina da Cachoeira.

No gráfico (FIG. 12), em que é estabelecida a razão entre a amostra ESP-01 e o padrão de referência (STD).

Figura 12 - Gráfico de razão multielementar



Observando o gráfico, destacam-se os elementos com razão superior a 1, o lítio (Li) com razão de 7,41, o gálio (Ga) com razão de 1,80, o nióbio (Nb) com razão de 5,00, o estanho (Sn) com razão de 2,21, o bismuto (Bi) com razão de 10,00, e o tório (Th) com razão de 1,75. Para os elementos que apresentam comportamento normalizado, com valores iguais ou próximos a 1, destacam-se o alumínio (Al), o ferro (Fe), o berílio (Be), o cobre (Cu), o cério (Cs), o urânio (U) e o cério (Ce). Os demais elementos encontram-se abaixo do valor de referência.

Dentro deste contexto, com base nas associações e composições discutidas nos tópicos 3.4 e 3.5 e no sistema de classificação de Černý e Ercit (2005) apresentado na TAB. 5, interpreta-se de maneira preliminar o pegmatito estudado como pertencente à família LCT. Conforme simplificado por Foca (2025), a assinatura geoquímica desta família é caracterizada pelo enriquecimento em Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ga, Ta > Nb, (B, P, F). Analisando o gráfico, a amostra apresenta enriquecimento na maioria destes elementos diagnósticos, com exceção do Rb e do Ta. Apesar disso, o conjunto da assinatura geoquímica aponta predominantemente para o sistema LCT. Adicionalmente, outro fator que corrobora esta classificação é o conjunto da assinatura geoquímica, associado à mineralogia identificada e ao contexto geológico, é compatível com um pegmatito peraluminoso. Através do processo de diferenciação e à evolução magmática, a razão K/Rb obtida é de 30,80, segundo os critérios apresentados por Viana *et al.* (2007) e Černý e Ercit (2005), valores inferiores a 100 podem ser indicativo de sistemas magmáticos evoluídos. Reforçando a interpretação de que se trata de um pegmatito em estágio avançado de diferenciação magmática. Por fim, outro indicador deste processo é a presença de Bi nos pegmatitos das suítes G4, principalmente em Coronel Murta, distrito de Araçuaí, com uma caracterização elementar de Na–B–Be–Li–P–Bi–F (Pedrosa-Soares, 2011).

Partindo para uma classificação mais ampla, as Tabelas 4, 5 e 6 apresentam a interpretação mineralógica para o pegmatito. O principal mineral-índice é o espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), cuja presença é reforçada pelo teor de 3,21 wt% de Li_2O obtido na análise geoquímica (TAB 9). É importante destacar que o refinamento *Rietveld* atual quantificou o espodumênio em 60,19% da amostra (FIG 15d), o que representa uma diferença expressiva em relação aos 15,33% descritos no estudo preliminar de Rodrigues Lima (2025). Essa diferença é explicada pela estratégia de amostragem: enquanto a primeira análise baseou-se em uma coleta aleatória, a segunda foi direcionada intencionalmente para áreas ricas no mineral verde (espodumênio), visando capturar a fase de maior relevância econômica. Sob o ponto de vista da integração quantitativa, uma amostra com 60,19% de espodumênio (teor teórico de 8% de Li_2O) teria um potencial de 4,81% de Li_2O , já na amostragem anterior (15,33%) apontaria um

valor do Li_2O em aproximadamente 1,23%. O valor calculado de 3,21 wt% é compatível com essa mineralogia, considerando que Harben (2002) descreve que, em amostras, os teores de Li_2O variam entre 1,5% e 7,0%.

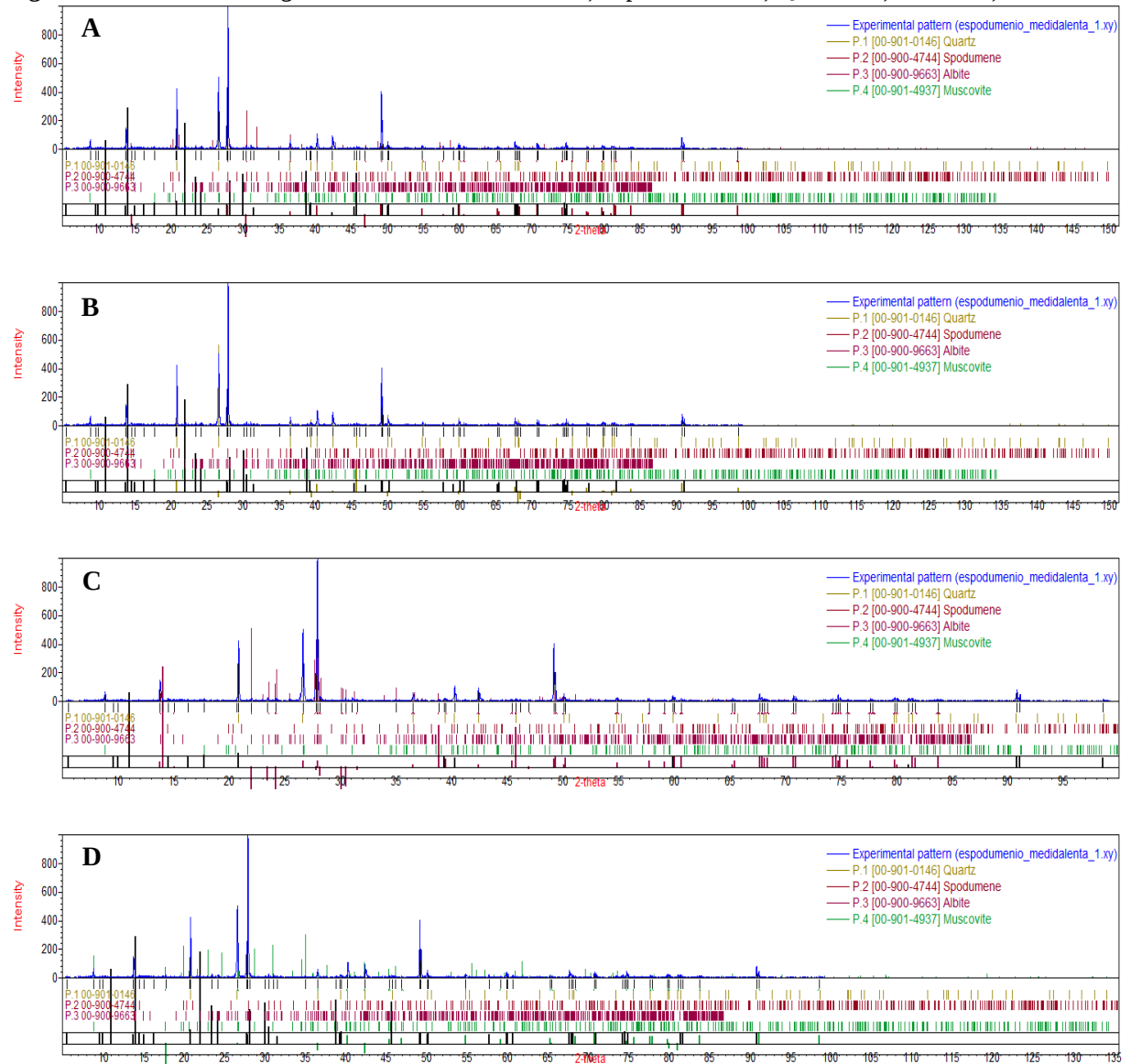
Sabe-se que os minerais que definem a matriz composicional dos pegmatitos graníticos são o quartzo (SiO_2) e os feldspatos alcalinos. No caso da amostra, investigada neste estudo por não apresentar sódio (Na) nos dados de ICP, por questões analíticas anteriormente discutidas, descarta-se a presença de albita a priori, propondo então a microclina (KAlSi_3O_8) como o feldspato alcalino mais provável. No grupo das micas, tem-se a Muscovita $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, composta por alumínio. As concentrações de Nb, Sn, Be, Bi e ETR sugerem a possível presença de fases minerais acessórias portadoras desses elementos. A confirmação, entretanto, exigiria análises mineralógicas pontuais, como MEV-EDS, microsonda eletrônica ou espectroscopia Raman em grãos individualizados.

Por meio desta suposição composicional, tanto mineralógica quanto elementar, o trabalho de Sá (1977) apresenta a tabela de classificação comparativa dos pegmatitos, construída por Schneiderhöhn (1961) e Varlamoff (1954-1971), compilando diversos pegmatitos do mundo, sendo que a rocha poderia ser classificada no Grupo IV de Nedumov, baseado nos pegmatitos da antiga URSS (União das Repúblicas Soviéticas Socialistas), cuja assembleia é composta por albita-espodumênio-quartzo e espodumênio-albita-microclina-quartzo-berilo, com minerais de Li, Cs e Ta-Nb. Ademais, Sá (1977) apresenta também a classificação dos pegmatitos complexos, na qual a amostra poderia se enquadrar no grupo microclínio-quartzo-espodumênio-albita-muscovita, em que o espodumênio compõe cerca de 20% dos corpos, o microclínio e a albita representam aproximadamente 40-45%, com predominância do microclínio, e a muscovita ocorre em proporções inferiores a 10%.

4.2 Análise de Fases Cristalinas por DRX e Refinamento *Rietveld*

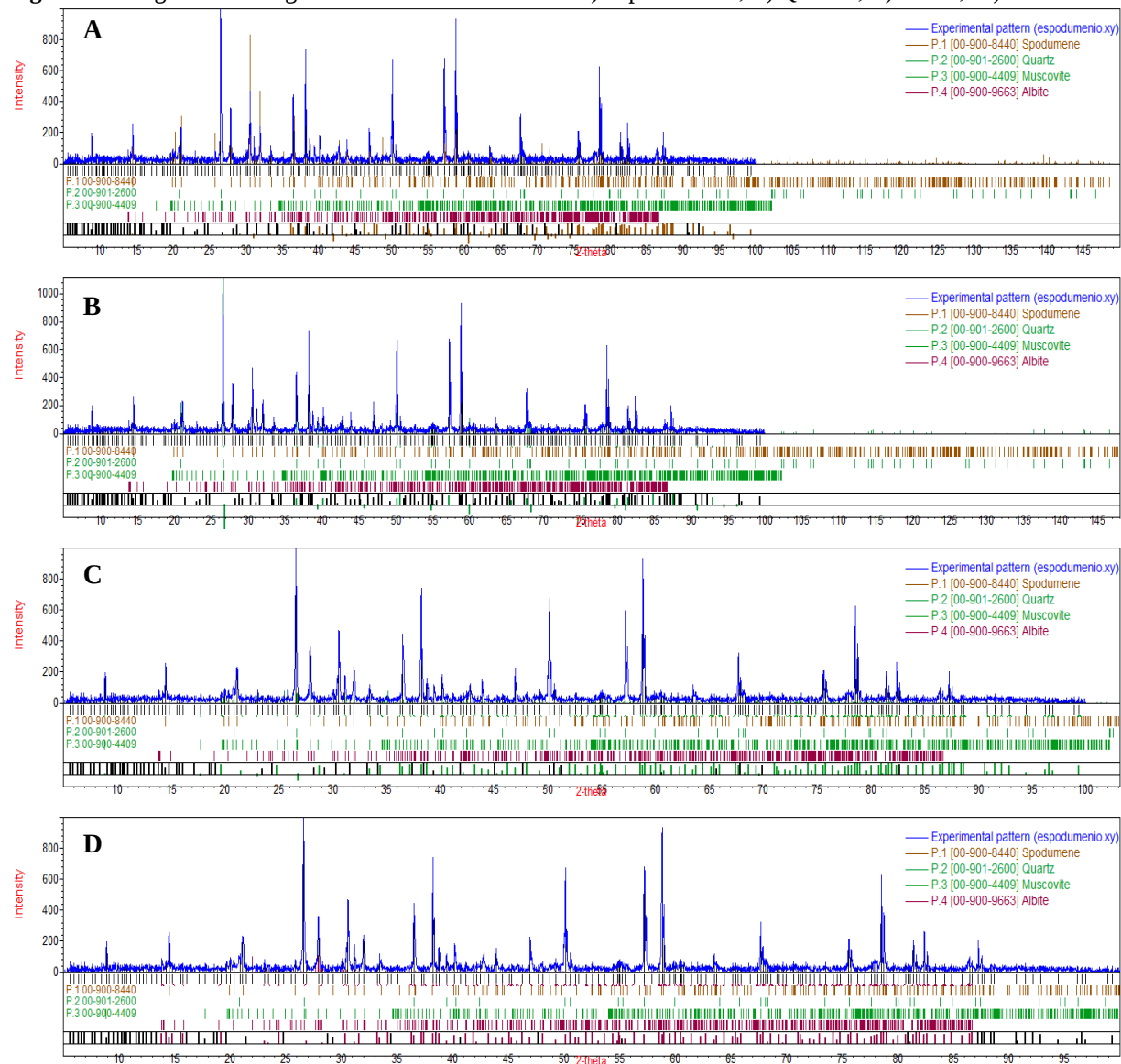
Visando a uma caracterização mais precisa da amostra, bem como à identificação das possíveis fases cristalinas presentes e à sua quantificação, empregou-se a difração de raios X (DRX). Foram realizadas duas análises por DRX. Na primeira, os resultados mostraram-se inconsistentes com o esperado para a amostra. Ao analisar o difratograma no *QualX2* (FIG. 13), foi possível identificar diversos minerais compatíveis com a composição esperada. Entretanto, essa identificação não se refletiu adequadamente no difratograma, principalmente pela ausência de picos característicos do espodumênio e das demais fases cristalinas esperadas.

Figura 13 - Primeiro difratograma de raios X da amostra . A) Espodumênio; B) Quartzo; C) Albite; D) Muscovita.



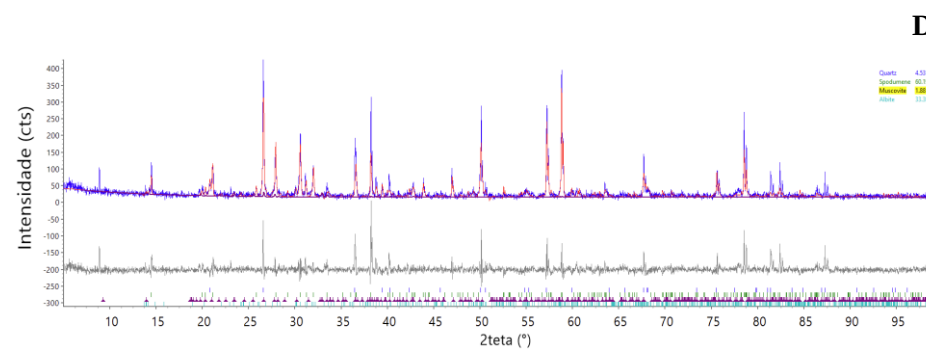
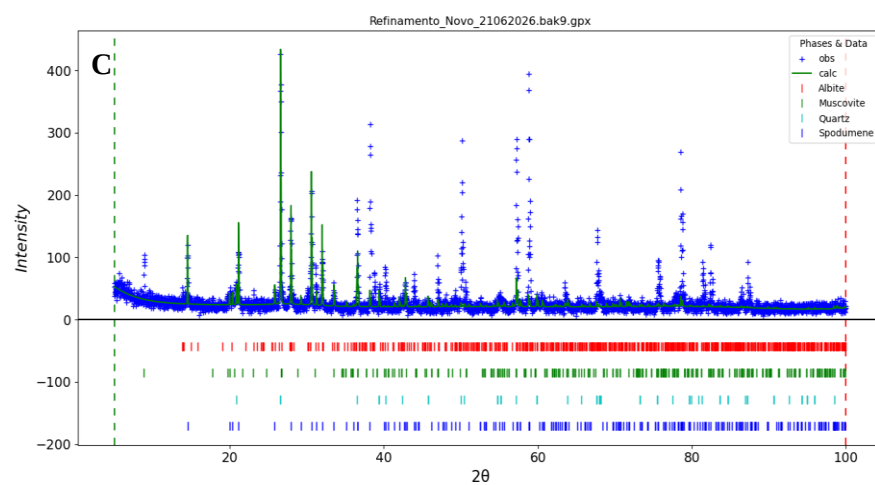
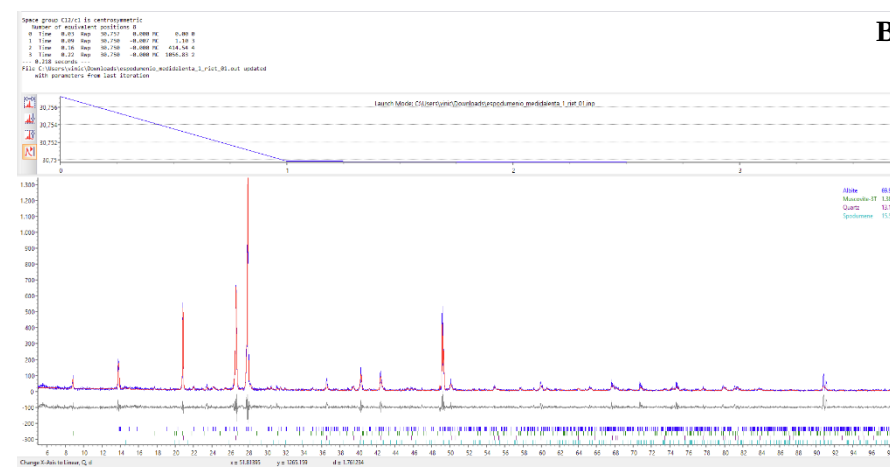
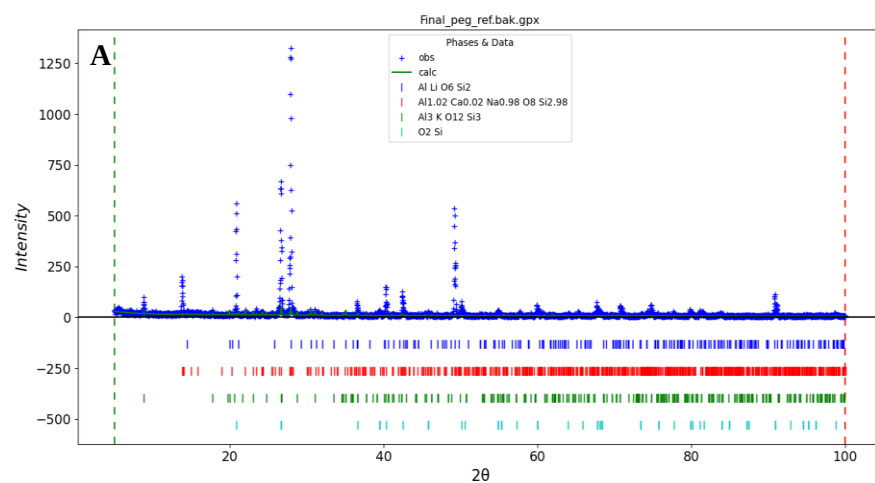
Na segunda análise de DRX (FIG. 14), os principais minerais foram identificados diretamente no *QualX2*, sem a necessidade de buscas avançadas.

Figura 14 - Segundo difratograma de raios X da amostra . A) Espodumênio; B) Quartzo; C) Albita; D) Muscovita.



Após a identificação das fases cristalinas, realizou-se o refinamento *Rietveld* utilizando os softwares *TOPAS* e *GSAS-II* (FIG. 15). Para os dados da primeira análise, o refinamento não produziu ajustes satisfatórios dos picos, reforçando a inconsistência observada anteriormente. Em contrapartida, para a segunda análise, os refinamentos realizados tanto pelo *GSAS*, quanto pelo *TOPAS*, apresentaram um ajuste adequado entre os picos experimentais e o modelo cristalográfico dos *CIFS* do *ICSD*, confirmando a presença das fases albita, quartzo, muscovita e espodumênio.

Figura 15 - Refinamento Rietveld. A e B) Refinamento realizado na primeira amostragem, respectivamente, nos softwares *GSAS-II* e *TOPAS*. C e D) Refinamento realizado na segunda amostragem, respectivamente, nos softwares *GSAS-II* e *TOPAS*.



Ambas as análises de DRX foram empregadas na mesma amostra de pegmatito. A diferença observada entre os resultados das duas análises de DRX decorre da maneira como o material foi preparado. Na primeira amostragem, o pó para a difração foi coletado a partir de diferentes partes da amostra por meio de batidas de martelo, portanto, liberando minerais de maneira aleatória, sem critério de escolha. Para a segunda amostra, a escolha do local de coleta foi intencional, sendo selecionada uma área com maior presença da matriz (minerais brancos e translúcidos), do mineral verde (possível espodumênio) e do mineral cristalizado em formato de placas (mica). Essa decisão foi tomada visando à compreensão dos minerais que apresentavam maior relevância na amostra de mão.

No que diz respeito ao refinamento *Rietveld* realizado no *software TOPAS*, na segunda amostragem, e as quatro fases minerais escolhidas (quartzo, espodumênio, muscovita e albita), aplicaram-se os seguintes processos: definição do grupo espacial, monitorização do R_{bragg} e refinamento do fator de *scale*. Após a aplicação destas informações primárias, passou-se ao refinamento dos parâmetros de perfil e microestrutura. O primeiro parâmetro ajustado foi o cristalito que, por meio das funções CS_L (Lorentziana) e CS_G (Gaussiana) da abordagem de Parâmetros Fundamentais, onde os parâmetros obtidos na difração são descritos por posições nas faixas 2θ por uma função gaussiana (Cheary e Coelho, 1992), ajusta o alargamento físico dos picos em relação à coerência da amostra. A função lorentziana é aplicada junto à Gauss para ajustar dimensões dos cristalitos (Cheary e Coelho, 1992). Em seguida, foi aplicado o refinamento da célula unitária, composta pelas dimensões (a, b, c) e ângulos (α , β , γ) da rede cristalina. Conforme Pawley (1981), o refinamento destes parâmetros permite que os erros em 2θ sejam corrigidos. Após o refinamento da célula unitária, foi aplicado o modelo de March-Dollase, corrigindo a Orientação Preferencial (PO) das fases cristalinas (TOPAS, 2003), como na muscovita com hábito lamelar e no espodumênio com hábito prismático ou acicular (Sá, 1977). Por fim, foi aplicado o refinamento estrutural nas posições atômicas (x, y, z) e no beq , parâmetro de deslocamento atômico isotrópico equivalente, considerados ajustes finos de conteúdo por Rietveld (1969).

Os resultados obtidos por meio destes refinamentos são definidos pelos valores de *Weighted Pattern R-factor* (r_{wp}), *Expected R-factor* (r_{exp}) e *Goodness of Fit* (gof), com valores respectivos de 27,29, 18,61 e 1,47 (Razão entre R_{wp}/R_{exp}). Conforme o TOPAS Manual (2003), o R_{wp} é a atribuição de um valor para cada ponto difratogramado que se baseia na estatística do ruído de fundo. Quanto menor o R_{wp} , mais próxima do experimento observado

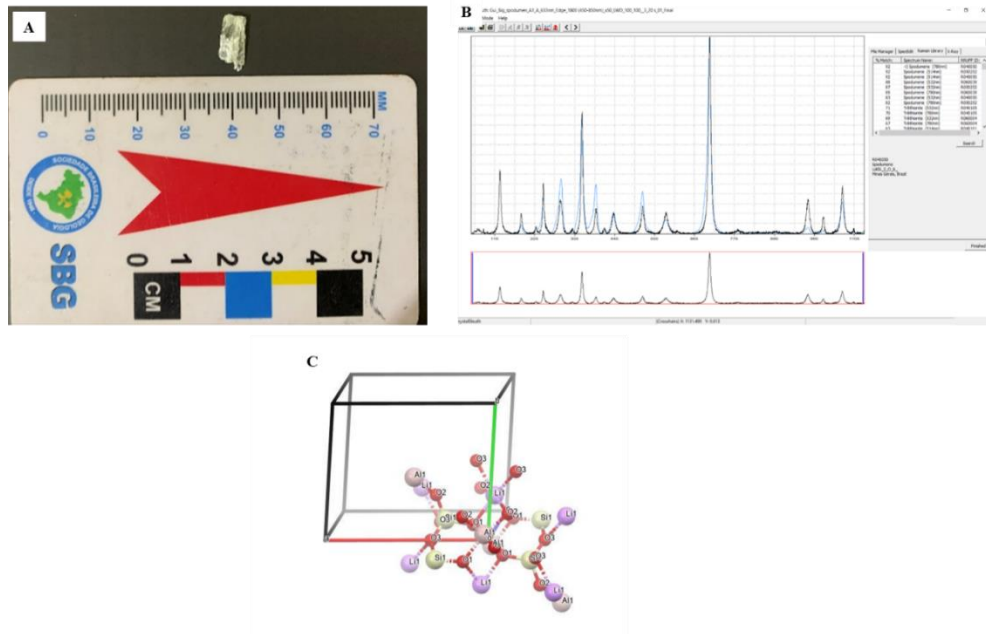
está a curva do modelo. No *Rexp*, seu cálculo é enfatizado na qualidade dos dados recolhidos e no ruído da medição. O seu valor atrela-se à quantia de pontos observados e de parâmetros refinados, junto ao tempo de contagem utilizado no difratômetro. Portanto, é um objetivo teórico que reflete a precisão dos dados experimentais sem qualquer relação com o modelo estrutural. Já o *GOF* é a razão entre os dois parâmetros supracitados (*Rwp/Rexp*) e tem a função de indicar o quão bom está o refinamento. Quanto mais próximo de 1,00, melhor está o ajuste. Por fim, foram obtidas seguintes quantificações minerais:

- Quartzo: 4,53%
- Espodumênio: 60,19%
- Muscovita: 1,88%
- Albita: 33,39%

Em que para o espodumênio, o refinamento da célula unitária revelou os seguintes parâmetros de rede: $a = 9,4657 (4) \text{ \AA}$, $b = 8,4091 (2) \text{ \AA}$ e $c = 5,2246 (2) \text{ \AA}$, com ângulos $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 110,16^\circ$ e $\gamma = 90^\circ$.

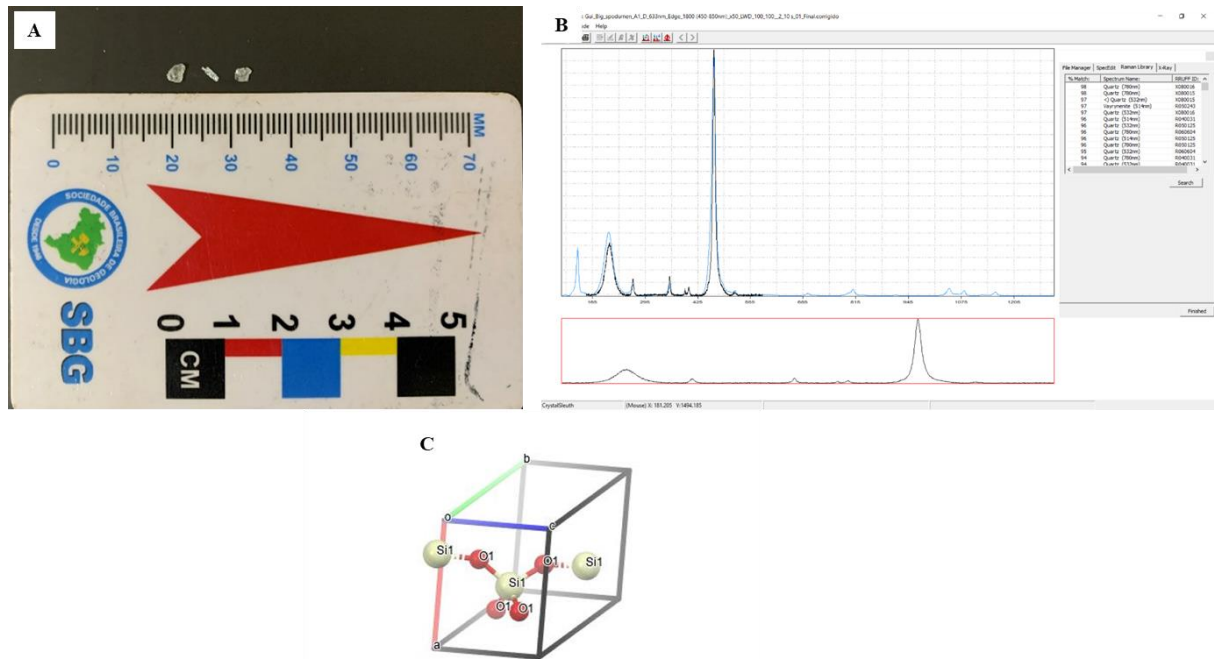
Para a confirmação destas quatro fases cristalinas supracitadas, cujas propriedades e fórmulas químicas estão resumidas na TAB. 3, utilizou-se o método *Raman*. A FIG. 16a apresenta o espodumênio, mineral bruto, o seu espectro Raman na FIG. 16b. O espectro experimental da amostra, representado em preto, foi comparado ao espectro de referência obtido no banco de dados *RRUFF*, apresentado em azul. e a sua estrutura cristalina na FIG. 16c. Como exposto na TAB. 3, o espodumênio possui fórmula química $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ na qual as ligações químicas entre oxigênio, alumínio e lítio possuem elevado caráter iônico como Li^+ , Al^{3+} e O^{2-} . Por outro lado, as ligações Si-O apresentam forte caráter covalente. De acordo com os princípios de Nakamoto (2009), as vibrações de estiramento de ligações covalentes produzem bandas Raman muito mais intensas do que as de ligações iônicas. Por esse motivo, os picos de maior intensidade resultam do estiramento das cadeias tetraédricas de Si-O com valores entre $665\text{-}775 \text{ cm}^{-1}$, enquanto as vibrações das ligações de caráter mais iônico geram picos de menor intensidade.

Figura 16 - A) Registro fotográfico em escala do espodumênio. B) Espectro Raman do espodumênio. C) Sistema cristalino e célula unitária do mineral.



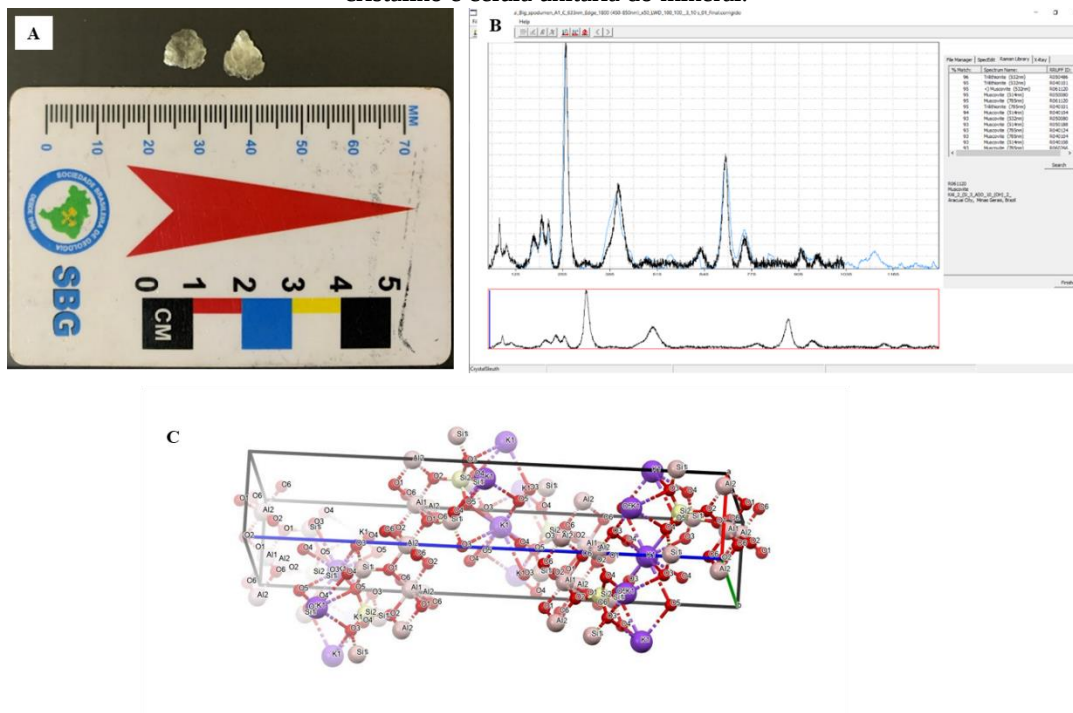
O quartzo, amostra bruta na FIG. 17a, o desvio Raman na FIG. 17b e a organização de sua rede cristalina na FIG. 17c. Este mineral apresenta ligações químicas de forte caráter covalente entre o silício e o oxigênio organizadas em tetraedros que formam a sua estrutura de fórmula SiO_2 . Esta estrutura é expressa na dispersão Raman por dois picos principais, sendo o mais intenso localizado por volta de $425\text{--}490\text{ cm}^{-1}$.

Figura 17 - A) Registro fotográfico em escala do quartzo. B) Espectro Raman do quartzo. C) Sistema cristalino e célula unitária do mineral.



Já a muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), detalhada na FIG. 18, apresenta a rede cristalina mais complexa entre os exemplares, composta por camadas Tetraédricas-Octaédricas-Tetraédricas (T-O-T). As estruturas octaédricas envolvendo ligações como Al-O e Fe-O resultam em picos de frequência média situados entre $360\text{--}530\text{ cm}^{-1}$. Os picos mais intensos, tal como no espodumênio, estão correlacionados às vibrações das cadeias tetraédricas de Si-O com valores próximos de 700 cm^{-1} e superiores a 900 cm^{-1} . As bandas de baixa frequência, entre 100 e 265 cm^{-1} , são atribuídas a vibrações coletivas da estrutura e à participação do K no sítio intercamada.

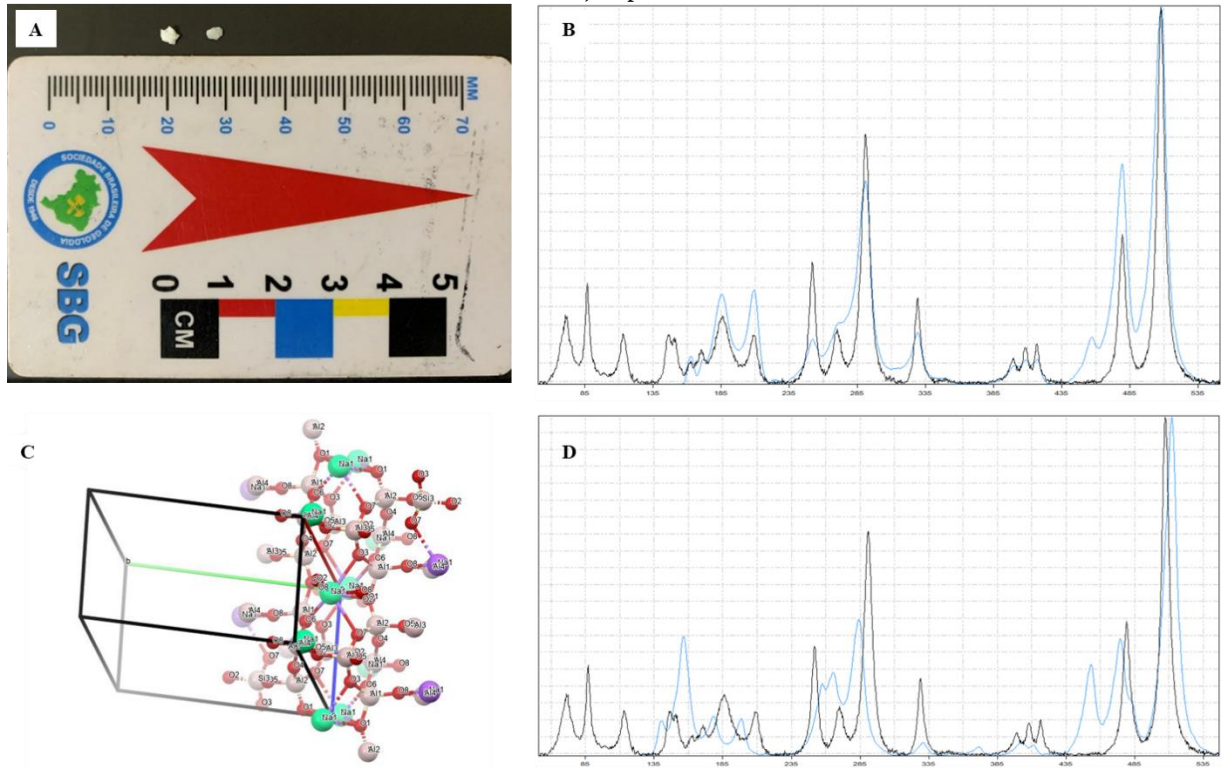
Figura 18 - A) Registro fotográfico em escala da muscovita. B) Espectro Raman da muscovita. C) Sistema cristalino e célula unitária do mineral.



Por fim, o último mineral examinado foi o que compunha a maior parte da matriz da rocha, apresentando coloração branca (FIG. 19a). Inicialmente, a análise considerou a possibilidade de feldspatos potássicos, comuns em matrizes de pegmatitos, porém os dados espectrais revelaram uma natureza distinta. Os picos detectados para a amostra apresentaram três máximos de intensidade característicos: o primeiro em aproximadamente 290 cm^{-1} o segundo e o terceiro em 479 cm^{-1} e 507 cm^{-1} , respectivamente, com picos de menores frequências situadas entre 60 e 360 cm^{-1} . Para a identificação, o espectro obtido foi comparado aos padrões do microclínio (FIG. 19d) e da albita (FIG. 19b). O microclínio apresentou picos que destoam significativamente da amostra, especialmente pelo deslocamento do pico principal para frequências mais altas ($\sim 513 \text{ cm}^{-1}$) e pela ausência de bandas diagnósticas abaixo de 125 cm^{-1} . Em contrapartida, observou-se uma congruência quase perfeita com o padrão da albita (FIG. 19c), nota-se que tanto as posições dos picos quanto as curvaturas se alinham com precisão. A identificação como albita é confirmada pela presença do pico principal em 507 cm^{-1} e do pico secundário em 479 cm^{-1} , assinatura clássica de plagioclásios sódicos, além da correspondência na região de modos de rede (baixas frequências). Dentro deste contexto, ao passo de sua estrutura cristalina resultante da fórmula química $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, a correspondência dos picos em 507 e 479 cm^{-1} reflete o arranjo ordenado dos anéis de tetraedros de silício e alumínio típicos da estrutura da albita, enquanto o pico em 290 cm^{-1} permite interpretar a presença do cátion sódio exercendo influência sobre a rede cristalina triclinica, diferenciando-

a dos feldspatos potássicos onde o maior raio iônico do potássio deslocaria essas frequências.

Figura 19 - A) Registro fotográfico em escala da albita. B) Espectro Raman da albita. C) Sistema cristalino e célula unitária do mineral; D) Espectro Raman do microclínio.



5 CONCLUSÃO

O estudo empregou diferentes técnicas analíticas para caracterizar as fases cristalinas de uma amostra de pegmatito granítico originário da Mina da Cachoeira, pertencente ao empreendimento Companhia Brasileira do Lítio, localizada no município de Araçuaí, ao norte do estado de Minas Gerais. Para a identificação das fases minerais, foram utilizadas a difração de raios X e a espectroscopia Raman. Os dados de DRX foram tratados pelo método de refinamento *Rietveld*, enquanto as concentrações elementares foram determinadas por ICP-MS e ICP-OES.

Os métodos empregados no processo descritivo permitiram a visualização de diferentes fases. As análises por ICP-MS e ICP-OES forneceram as concentrações elementares da amostra. Posteriormente, alguns elementos foram convertidos para suas formas equivalentes em óxidos. Entre os óxidos maiores, foi possível identificar os teores de 17,28 wt% em massa de Al_2O_3 , atrelado ao caráter peraluminoso da rocha, entretanto, a ausência de dados completos de Na_2O e dos demais óxidos limita a avaliação do índice de saturação em alumina. Foram calculados teores de 1,39% de Fe_2O_3 total e 3,21% de Li_2O , calculado com base nos 1,49% de Li óbitos pelas análises, confirmando a presença significativa de lítio na alíquota analisada. Os resultados químicos permitiram sugerir possíveis fases portadoras dos elementos detectados, como o espodumênio como mineral-índice de lítio, feldspato alcalino e muscovita, identificada por DRX e *Raman*. As concentrações de Nb, Sn, Be, Bi e ETR sugerem a possível ocorrência de fases acessórias portadoras desses elementos. Contudo, sua confirmação exige análises mineralógicas pontuais, como MEV-EDS, microsonda eletrônica ou *Raman* em grãos individualizados. A presença de espodumênio e as concentrações de Li, Be, Cs, Sn, Ga e Nb são compatíveis com características de pegmatitos da família LCT. Entretanto, a classificação deve ser considerada preliminar, tendo em vista o número limitado de amostras, os valores abaixo do limite de detecção e a ausência de alguns elementos diagnósticos.

A análise por DRX, complementada pelo refinamento *Rietveld*, permitiu identificar quatro fases cristalinas principais e suas quantificações: quartzo (4,53%), albita (33,39%), espodumênio (60,19%) e muscovita (1,88%). O ajuste entre o difratograma experimental e os padrões calculados a partir dos modelos cristalográficos obtidos em arquivos CIF. Em que, o refinamento apresentou *GOF* de 1,47, embora a avaliação da qualidade do ajuste também deva considerar o *Rwp*, a curva de diferença e os índices específicos de cada fase. e uma quantificação para a fase espodumênio, valor que é coerente ao teor de Li_2O . Além disso, a caracterização estrutural definiu os parâmetros de rede do espodumênio como: $a = 9,4657 \text{ \AA}$, b

$a = 8,4091 \text{ \AA}$ e $c = 5,2246 \text{ \AA}$, expondo seu sistema monoclinico. A identificação foi complementada pela espectroscopia *Raman* realizada em grãos selecionados das quatro fases minerais. Ressalta-se que o resultado do DRX está relacionado à preparação da amostra, uma vez que os resultados distintos obtidos nas duas análises demonstram a forte heterogeneidade mineralógica da amostra. A segunda alíquota, selecionada em uma região contendo os principais minerais reconhecidos macroscopicamente, favoreceu sua identificação por DRX, mas não deve ser considerada representativa da composição modal de toda a amostra.

Por fim, os resultados evidenciam a importância da integração de diferentes métodos de análise na identificação da composição do pegmatito. Os dados químicos permitiram discutir possíveis minerais acessórios dos elementos detectados, enquanto DRX e *Raman* forneceram a identificação direta das principais fases cristalinas. A integração dos resultados permitiu revisar a interpretação inicial do feldspato presente na matriz, identificando-o como albita, e não como microclínio. Sendo assim, pode-se dizer que o trabalho alcançou seus objetivos, produzindo uma interpretação mineralógica mais consistente, visando a caracterização detalhada da amostra e expondo sua viabilização econômica em decorrência da presença de óxido de Li em teores viáveis para mineração.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AARÃO, G. M. Caracterização Mineralógica e Tecnológica de Feldspatos Piroexpansíveis de Pegmatitos do Distrito de Conselheiro Pena, MG, 2015.

AGÊNCIA BRASIL. Relatório do clima diz que meta de 1,5 °C pode ser superada em 7 anos. Brasília, 5 dez. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2023-12/relatorio-do-clima-diz-que-meta-de-15oc-pode-ser-superada-em-7-anos>. Acesso em: 11 jan. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sumário Mineral Brasileiro 2023: Lítio (ano-base 2022). Brasília: ANM, 2023

ALTOMARE, Angela *et al.* QUALX2. 0: a qualitative phase analysis software using the freely available database POW_COD. *Applied Crystallography*, v. 48, n. 2, p. 598-603, 2015

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S.; PEDROSA-SOARES, A. C.; PERES, G. G.; CRUZ, S. C. P.; WHITTINGTON, A. Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo orogen in Brazil and Africa: nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, v. 149, p. 43–63, 2006.

ALKMIM, F. F.; PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; CRUZ, S. C. P. Sobre a evolução tectônica do Orógeno Araçuaí–Congo Ocidental. *Geonomos*, v. 15, 2007.

ARSLAN, Z.; LOWERS, H. Trace Silicon Determination in Biological Samples by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS): Insight into the Volatility of Silicon Species in Hydrofluoric Acid Digests for Optimal Sample Preparation and Introduction to ICP-MS. *Minerals*, v. 14, 299, 2024.

ASOCIACIÓN DE SERVICIOS DE GEOLOGÍA Y MINERÍA IBEROAMERICANOS (ASGMI). Manual de metodologias geoquímica de países ibero-americanos– Informacion Geoquímica para la sociedade. Version provisória, p. 223, 2022.

BABINSKI, M.; GRADIM, R. J.; PEDROSA-SOARES, A. C.; ALKMIM, F. F.; NOCE, C. M.; LIU, D. Geocronologia U–Pb (SHRIMP) e Sm–Nd de xistos verdes basálticos do Orógeno Araçuaí: implicações para a idade do Grupo Macaúbas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 4 (Suplemento), p. 77–81, 2005.

BABINSKI, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; MARTINS, M.; LIU, D.; NOCE, C. M.; KARFUNKEL, J. U–Pb SHRIMP dating of detrital zircons from the Macaúbas Group, southeast Brazil: implications on the depositional age and provenance of pre-glacial and glaciogenic sediments. In: SYMPOSIUM ON NEOPROTEROZOIC–EARLY PALAEOZOIC EVENTS IN SW GONDWANA, 3., 2007, Stellenbosch. Proceedings... Stellenbosch: IGCP-478, 2007.

Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P. (ed.), Rare earth element geochemistry. Elsevier, pp. 63-114, 1984.

BRITO, L. D. S. Caracterização mineralógica e geoquímica de concentrados de bateia da região centro leste da Bacia Rio do Jequitinhonha para prospecção de lítio. 2024. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Geológica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

BRUKER AXS. TOPAS 5: Technical Reference. Karlsruhe: Bruker AXS, 2003

CERNÝ, P. Rare-element granitic pegmatites. Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Geosci. Canada, 18, 49-67., 1991.

CERNÝ, P. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research. Applied Geochem., 7, 393-416., 1992.

CERNÝ, P., BLEVIN, P.L., CUNEY, M., LONDON, D. Granite-related deposits. Econ. Geol., 100th anniversary, 337-370., 2005.

ČERNÝ, P.; ERCIT, T. S. The classification of granitic pegmatites revisited. Canadian Mineralogist, v. 43, p. 2005–2026, 2005.

CERNÝ, P.; MEINTZER, R. E.; ANDERSON, A. J. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: selected examples of data and mechanisms. The Canadian Mineralogist, v. 23, p. 382–421, 1985.

CHEMALE JR., F.; DUSSIN, I. A.; MARTINS, M.; SANTOS, M. N. Nova abordagem tectono-estratigráfica do Supergupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). Geonomos, v. 19, n. 2, p. 173-141, 2011.

CLAFFY, E. W. Composition, tenebrescence and luminescence of spodumene minerals. *American Mineralogist*, v. 40, p. 719–731, 1955.

CHEARY, R. W.; COELHO, A. A. A fundamental parameters approach of X-ray line-profile fitting. *Journal of Applied Crystallography*, v. 25, p. 109–121, 1992.

COELHO, Alan A. TOPAS and TOPAS-Academic: an optimization program integrating computer algebra and crystallographic objects written in C++. *Applied Crystallography*, v. 51, n. 1, p. 210-218, 2018.

CORRÊA-GOMES, L. C.; OLIVEIRA, E. P. O enxame radial gigante de diques máficos da província Bahia–Congo: implicações reológicas e tectônicas da presença de uma pluma mantélica na interface América do Sul–África, 1,0 Ga atrás. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5., 1997, Pirenópolis. Anais... Pirenópolis: Sociedade Brasileira de Geologia, 1997. p. 52–55.

DIAS, C. H.; CHAVES, M. L. S. C. Uncommon Nb-tantalate from the Cachoeira mine, Araçuaí pegmatite district (Minas Gerais). *REM: International Engineering Journal*, v. 68, n. 4, p. 401–408, 2015.

DIDÁTICO/USP. Feldspato Alcalino. São Paulo: Instituto de Geociências da USP, 2025. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/silicatos/tectossilicatos/feldspato-alcalino/>. Acesso em: 25 jan. 2026.

DEER W. A., HOWIE R. A., ZUSSMAN J. *Minerais Constituintes das Rochas – Uma Introdução*. 2ª Ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 558p, 1966.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Data quality assessment: statistical methods for practitioners*, EPA QA/ G-9S. Washington, DC: 20460. p. 198 2006.

FOCA, J. V. S. Caracterização mineralógica do corpo pegmatítico “Azurite” em Araçuaí (MG). 2025. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geografia, Geociências e Saúde Coletiva, Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2025.

GOLDSCHMIDT, V. M. *Geochemistry*. Clarendon Press, Oxford. p. 730, 1954.

GROSSI-SAD, J.H., LOBATO, L.M., PEDROSA-SOARES, A.C. & SOARES-FILHO, B.S. *Projeto Espinhaço em CD-ROM*. CODEMIG, Belo Horizonte, 2693 p. e 23 mapas, 1997.

HARBEN, P. W. Lithium Minerals and Compounds. In: The Industrial Minerals HandyBook IV – A Guide to Markets, Specifications, & Prices, 4th Edition, p.184-192, 2002.

JOLLIFF, B. L.; PAPIKE, J. J.; SHEARER, C. K. Fractionation trends in mica and tourmaline as indicators of pegmatite internal evolution: Bob Ingersoll pegmatite, Black Hills, South Dakota. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51, 519-534, 1987.

JOLLIFF, B. L.; PAPIKE, J. J.; SHEARER, C. K. Petrogenetic relationships between pegmatite and granite based on geochemistry of muscovite in pegmatite wall zones, Black Hills, South Dakota, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 1915-1939, 1992.

KINAST, É. J. Refinamento estrutural com o método de Rietveld: implementação e ensaios com o programa FullProf. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

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

LAETSCH, T.; DOWNS, R. Software for identification and refinement of cell parameters from powder diffraction data of minerals using the RRUFF Project and American Mineralogist Crystal Structure Databases. In: 19th General Meeting of the International Mineralogical Association, Kobe, Japan. 2006. p. e28.

LIMA, S. A. A.; MARTINS-NETO, M. A.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CORDANI, U. G.; NUTMAN, A. A Formação Salinas na área-tipo, NE de Minas Gerais: uma proposta de revisão da estratigrafia da Faixa Araçuaí com base em evidências sedimentares, metamórficas e idades U–Pb SHRIMP. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, p. 491–500, 2002.

MACHADO, N.; SCHRANK, A.; ABREU, F. R.; KNAUER, L. G.; ALMEIDA-ABREU, P. A. Resultados preliminares da geocronologia U–Pb na Serra do Espinhaço Meridional. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 5.; SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NÚCLEO BRASÍLIA, 1. p. 171–174., 1989.

MARTINS-NETO, M. A.; HERCOS, C. M. Sedimentation and tectonic setting of Early Neoproterozoic glacial deposits in southeastern Brazil. In: International Association of Sedimentologists Special Publication, v. 33, p. 383–403, 2000.

MARTINS-NETO, M. A.; PEDROSA-SOARES, A. C.; LIMA, S. A. A. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basins from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 141/142, p. 343–370, 2001.

MARTINS-NETO, M. A. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: Registro de uma bacia rift-sag do Paleo/Mesoproterozoico. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, p. 151–168, 1998.

MASON, B. H. *Princípios de geoquímica*. São Paulo: EDUSP/Polígono, p. 403, 1971.

MINDAT.ORG. Hudson Institute of Mineralogy, 2025. Disponível em: <https://www.mindat.org>. Acesso em: 25 jan. 2026.

MOTTER B. Feldspar for the sanitaryware industry. *Industrial Minerals*, n. 390, 87p., 2000.

NAKAMOTO, K. *Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds*. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2009. Part A and B.

NELVAM, R. Desvendando as propriedades físicas e estruturais de minerais estratégicos contendo lítio. 2024. Relatório de Iniciação Científica – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

NOCE, C. M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; GROSSI-SAD, J. H.; BAARS, F. J.; GUIMARÃES, M. L. V.; MOURÃO, M. A. A.; OLIVEIRA, M. J. R.; ROQUE, N. C. Nova subdivisão estratigráfica regional do Grupo Macaúbas na Faixa Araçuaí. *Boletim da Sociedade Brasileira Geologia - Núcleo Minas Gerais*, v. 14, p. 29–31, 1997.

NOCE, C. M. et al. Evolution of polycyclic basement complexes in the Araçuaí Orogen, based on U–Pb SHRIMP data: implications for Brazil–Africa links in Paleoproterozoic time. *Precambrian Research*, v. 147, p. 60–78, 2007.

RODRIGUES LIMA, G. Desvendando as propriedades físicas e estruturais de minerais estratégicos contendo lítio – Parte 2: análise quantitativa e cristal química. 2025. Relatório Final de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/CPRM) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

OLESIK, J. W. Elemental analysis using ICP-OES and ICP/MS: an evaluation and assessment of remaining problems. *Analytical Chemistry*, v. 63, n. 1, p. 12A–21A, 1991.

PAWLEY, G. S. Unit-cell refinement from powder diffraction scans. *Journal of Applied Crystallography*, v. 14, p. 357–361, 1981.

PECHARSKY, V. K.; ZAVALIJ, P. Y. Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. [S.l.]: Springer, 2005.

PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M. Where is the suture zone of the Neoproterozoic Araçuaí–West-Congo orogen? In: 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON BASEMENT TECTONICS. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 1998. p. 35–37.

PEDROSA-SOARES, A. C. *et al.* The Araçuaí–West Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*, v. 110, p. 307–323, 2001.

PEDROSA-SOARES, A. C.; CASTAÑEDA, C. *et al.* Magmatismo e tectônica do Orógeno Araçuaí no extremo leste de Minas Gerais e norte do Espírito Santo. *Geonomos*, v. 14, p. 97–111, 2006.

PEDROSA-SOARES, A. C. *et al.* Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida (1977). *Geonomos*, v. 15, p. 1–16, 2007.

PEDROSA-SOARES, A. C. *et al.* Late Neoproterozoic–Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources Geological Society, London, Special Publications, v. 31, p. 25–51, 2011.

PINTO, C. P.; DRUMOND, J. B. V.; FÉBOLI, W. L. (coord.). Projeto Leste, Etapa 1. Belo Horizonte: CPRM–COMIG, 1997.

RIETVELD, H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*, v. 2, p. 65–71, 1969.

ROLLINSON, H. R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. London: Longman Scientific & Technical, p. 352, 1993.

SÁ, J. H. S. Pegmatitos litiníferos da região de Itinga–Araçuaí, Minas Gerais. 1977. 122 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977.

SANTOS, M. J. A.; BASTOS, A. C. L. et al. Caracterização tecnológica do minério de lítio pegmatítico da mina da CBL, Araçuaí – MG. *Revista Aracê*, v. 6, n. 4, p. 17847-17859, 2024.

SOTO GÓMEZ, L. K. Desenvolvimento e aplicações da técnica de espectroscopia Raman anti-Stokes coerente multiplex. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

SOUZA, M. E. *et al.* Time and isotopic constraints for Early Tonian basaltic magmatism in a large igneous province of the São Francisco–Congo paleocontinent (Macaúbas basin, Southeast Brazil). *Precambrian Research*, v. 373, p. 1-25, 2022.

STATISTA. Average lithium carbonate price from 2010 to 2022. 2023. Disponível em: <https://www.statista.com>. Acesso em: 11 jan. 2026.

TOBY, Brian H.; VON DREELE, Robert B. GSAS-II: the genesis of a modern open-source all purpose crystallography software package. *Applied Crystallography*, v. 46, n. 2, p. 544-549, 2013.

TYLER, G. ICP-OES, ICP-MS and AAS techniques compared. Technical Note 05. Longjumeau: Jobin Yvon S.A.S., Horiba Group, 2015.

UHLEIN, A.; QUEMENEUR, J. J. G. Estrutura e deformação brasileira nos diques máficos da Serra do Espinhaço Meridional. *Geonomos*, v. 8, n. 2, p. 19–25, 2001.

UHLEIN, A. *et al.* Neoproterozoic glacial and gravitational sedimentation on a continental rifted margin: the Jequitai–Macaúbas sequence (Minas Gerais, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 12, p. 435–451, 1999.

VIANA, R. R.; JORDT-EVANGELISTA, H.; STERN, W. B. Geochemistry of muscovite from pegmatites of the Eastern Brazilian Pegmatite Province: a clue to petrogenesis and mineralization potential. *European Journal of Mineralogy*, v. 19, p. 745–755, 2007.

WARNER, J. T. The handbook of lithium-ion battery pack design: chemistry, components, types and terminology. Amsterdam: Elsevier, 2015.