



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



Douglas Levindo de Jesus

**ESTUDO PETROGRÁFICO E MINERALÓGICO DAS  
ZONAS HIDROTERMALIZADAS E DE LATERIZAÇÃO DO  
DEPÓSITO DE FOSFATO DA MOSAIC, PATROCÍNIO, MG**

**MONOGRAFIA nº 560**

Ouro Preto  
Agosto 2025

Douglas Levindo de Jesus

**ESTUDO PETROGRÁFICO E MINERALÓGICO DAS  
ZONAS HIDROTERMALIZADAS E DE LATERIZAÇÃO DO  
DEPÓSITO DE FOSFATO DA MOSAIC, PATROCÍNIO, MG**

Monografia do Projeto Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Projeto final de Curso II - GEO144, ano 2025/1.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano

OURO PRETO

2025

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

J585e Jesus, Douglas Levindo de.  
Estudo petrográfico e mineralógico das zonas hidrotermalizadas e de laterização do depósito de fosfato da Mosaic, Patrocínio, MG.  
[manuscrito] / Douglas Levindo de Jesus. - 2025.  
74 f.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Petrografia. 2. Mineralogia. 3. Fosfatos. 4. Microscopia Eletrônica de Varredura. I. Cipriano, Ricardo Augusto Scholz. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 553.64

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Douglas Levindo de Jesus**

**Estudo petrográfico e mineralógico das zonas hidrotermalizadas e de laterização do depósito de fosfato da Mosaic, Patrocínio, 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 29 de agosto de 2025

### Membros da banca

Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Msc. Vinícius Rodrigues dos Santos - Universidade Federal de Pernambuco  
Dr. Leonardo Martins Graça - Universidade Federal de Ouro Preto

Ricardo Augusto Scholz Cipriano, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Augusto Scholz Cipriano, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/09/2025, às 07:41, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0974329** e o código CRC **FD5E2B4D**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, ao meu pai, Adauto, minha mãe, Adriana, e meu irmão João Vitor, pelo incentivo e apoio para chegar até aqui e ajudar a traçar esse caminho e concluir mais uma fase da minha vida e, por sempre acreditar em meu potencial e ter servido de inspiração para chegar até aqui.

Aos meus familiares, em especial meu tio Magno, tia Blandina e tia Zenia.

Aos grandes amigos que a Geologia me deu, Guilherme Cardoso, Jorge Gabriel, Isadora Quintiliano, Fernando Antônio, Rafaela Elizabete, Lucas Medeiros, Pedro Armond, Scarletly Ellen, por sempre estarem ao meu lado e por terem acreditado em mim durante todos esses anos de grande amizade.

Aos meus amigos de Sumaré-SP, Diegão, Ricardo e Johannes.

Aos meus amigos do cursinho pré-vestibular Zap de Campinas-SP, Romario Luiz, Thiago Teles, Marília, Rose, Ellen e Charles.

Ao meu orientador, Ricardo Scholz, por todo o apoio, incentivo, paciência e por me ajudar nas partes mais difíceis deste trabalho.

Aos projetos CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – 310072/2021-2), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – PPM-00588-18, APQ-00764-23 e APQ-02529-24).

À Mosaic por apoiar o trabalho de campo realizado pelo orientador, em especial aos geólogos, Wendel, Sérgio Tulio e Paulo.

Aos técnicos que geraram os dados no Laboratório de Microscopia e Microanálises do DEGEO/EM - Laboratório integrante da RMic, Rede de Microscopia e Microanálise de Minas Gerais – FAPEMIG.

À Fundação Victor Dequech (Projeto - Estudo das ocorrências minerais históricas do Brasil e seu potencial para descoberta de novos minerais).

Ao laboratório de laminação LAMIM do DEGEO/EM.

À cidade linda é amada de Ouro Preto.

Aos amigos fiz em Ouro Preto e minha amada República Burnout por toda irmandade que construímos ao longo de todos esses anos. À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino público de qualidade durante toda a graduação.

Aos membros da banca por aceitarem o convite de estarem comigo nesse dia tão aguardado da Defesa do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

## RESUMO

A Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP) é reconhecida por suas rochas alcalinas ultrapotássicas e depósitos minerais ricos em elementos como Nb, Ba, Ti, Sr, e P, destacando-se o Complexo Alcalino-Carbonatítico de Serra Negra. Este estudo visa contribuir para o entendimento geológico do complexo, explorando suas paragêneses minerais e as implicações para a extração de fosfato. Esperam-se resultados que contribuam para a compreensão da mineralogia do carbonatito de Serra Negra, revelando a presença de uma associação mineral distinta de outros depósitos brasileiros, focando na extração de fosfatos de Ba e Fe. A caracterização detalhada das paragêneses minerais pode fornecer informações cruciais para o desenvolvimento de rotas de processamento econômico viáveis. As rochas carbonatíticas são definidas, de acordo com a União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS), como contendo mais de 50% de carbonatos e uma proporção limitada de sílica. Para isso, foram feitas análises petrográficas em microscópio óptico por meio de lâminas delgadas que mostram uma mineralogia principal de carbonatos, minerais opacos e minerais acessórios, além de feldspatos alcalinos, que ocorrem associados aos carbonatitos. Também foram feitas análises químicas pontuais semi-quantitativas utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura com Energy Dispersive Spectroscopy (MEV-EDS). O estudo permitiu a identificação e classificação de uma mineralogia predominantemente composta por carbonatos (dolomita, siderita e stroncianita), além da classificação e identificação minerais, vivianita, fosfato de cério, rabdofana-(Ce), minerais óxido, ilmenita e geikielita, minerais raros, como switzerita (fosfato de manganês), perloffita e rodocrosita.

**Palavras chave:** Carbonatito, Província Ígnea do Alto Paranaíba, Serra Negra, Fosfato.

## ABSTRACT

The Igneous Province of Alto Paranaíba (APIP) is recognized for its alkaline ultrapotassic rocks and mineral deposits rich in elements such as Nb, Ba, Ti, Sr, and P, highlighting the Serra Negra Carbonatite Complex. This study aims to contribute to the geological understanding of the complex by exploring its mineral parageneses and the implications for phosphate extraction. Expected results include a better understanding of the mineralogy of the Serra Negra carbonatite, revealing a mineral association distinct from other Brazilian deposits, with a focus on extracting Ba and Fe phosphates. Detailed characterization of mineral parageneses can provide crucial information for developing economically viable processing routes. Carbonatite rocks are defined, according to the International Union of Geological Sciences (IUGS), as containing more than 50% carbonates with a limited silica content. For this purpose, petrographic analyses were conducted using optical microscopy on thin sections, revealing a primary mineralogy of carbonates, opaque minerals, and accessory minerals, as well as alkaline feldspars associated with the carbonatites. Additionally, semi-quantitative point chemical analyses were performed using Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS). The study allowed for the identification and classification of a mineralogy predominantly composed of carbonates (dolomite, siderite, and strontianite), as well as the classification and identification of minerals such as vivianite, cerium phosphate, rabdofana-(Ce), oxide minerals, ilmenite, and geikielite. Rare minerals such as switzerite (manganese phosphate), perloffite, and rodocrosite were also identified.

**Keywords:** Carbonatite, Igneous Province of Alto Paranaíba, Serra Negra, Phosphate.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Mapa de Localização. ....	16
<b>Figura 2</b> - Mapa geológico da Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP). ....	21
<b>Figura 3</b> - Mapa geológico esquemático do complexo de Serra Negra, com base em testemunhos de sondagem e dados de exploração. ....	23
<b>Figura 4</b> - Representação macroscópica do Carbonatito . ....	29
<b>Figura 5</b> - Diagrama de classificação química para carbonatitos de Woolley e Kempe ( 1989). .....	29
<b>Figura 6</b> - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, carbonatos à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-67. ....	30
<b>Figura 7</b> - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, mineral de flogopita à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-67. ....	31
<b>Figura 8</b> - Fotomicrografia com objetiva de aumento 10x, minerais de quartzo à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-22. ....	32
<b>Figura 9</b> - Fotomicrografia com objetiva de aumento 20x, minerais de apatita à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-14. ....	33
<b>Figura 10</b> - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, minerais de Mg-clorita em veio à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-26 .....	34
<b>Figura 11</b> - Fotomicrografia com objetiva de aumento 20x, mineral de rutilo à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-07 .....	35
<b>Figura 12</b> - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, minerais de plagioclásio à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-27.	36
<b>Figura 13</b> - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, mineral de microclina à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-27 .....	37
<b>Figura 14</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-07. ....	39
<b>Figura 15</b> - Espectro 2 com a composição química referente ao mineral vivianita, LSC-07.	39
<b>Figura 16</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-14. ....	41
<b>Figura 17</b> - Espectro 6 com a composição química referente ao mineral siderita, LSC-14 ....	42
<b>Figura 18</b> - Espectro 7 com a composição química referente ao mineral siderita, LSC-14 ....	42
<b>Figura 19</b> - Espectro 9 com a composição química referente ao mineral siderita, LSC-14 ....	43
<b>Figura 20</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-22. ....	44

<b>Figura 21</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-26.....	46
<b>Figura 22</b> - Espectro 2 com a composição química referente ao mineral ilmenita, LSC-26...	46
<b>Figura 23</b> - Espectro 3 com a composição química referente ao mineral geikielita, LSC-26.	47
<b>Figura 24</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-27.....	48
<b>Figura 25</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-67 imagem 1. sulfeto de ferro sigla (Sul) e fosfato de cério sigla (Fot). .....	50
<b>Figura 26</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-67 imagem 2. rabdofana-(Ce) sigla (Rab). .....	51
<b>Figura 27</b> - Espectro 3 com a composição química referente ao mineral estroncianita, LSC-67 .....	51
<b>Figura 28</b> - Espectro 4 com a composição química referente ao mineral dolomita, LSC-67..	52
<b>Figura 29</b> - Espectro 5 com a composição química referente ao sulfeto de ferro, LSC-67.....	52
<b>Figura 30</b> - Espectro 10 com a composição química referente ao fosfato de cério, LSC-67 ..	53
<b>Figura 31</b> - Espectro 18 com a composição química referente ao mineral dolomita, LSC-67. .....	53
<b>Figura 32</b> - Espectro 21 com a composição química referente ao mineral rabdofana-Ce, LSC- 67.....	54
<b>Figura 33</b> - Diagrama ternário (CaMg-CaSr-CaFe) espectro 4, carbonato classificado dentro do grupo da dolomita.....	56
<b>Figura 34</b> - Diagrama ternário (CaMg-CaMn-CaFe) espectro 18, carbonato classificado dentro do grupo da dolomita.....	57
<b>Figura 35</b> - Cristais de switzerita em matriz de perloffita.....	59
<b>Figura 36</b> - Imagem realizada BSE no MEV, amostra de cristal fixado em fita condutora de carbono , switzerita.....	59
<b>Figura 37</b> - Espectro 4 com a composição química referente ao mineral switzerita.....	60
<b>Figura 38</b> - Espectro 5 com a composição química referente ao mineral switzerita.....	60
<b>Figura 39</b> - Cristais euédricos de perloffita. Campo de visão de 5mmx3mm. V-Cristais individuais com aproximadamente 0,3mm.....	62
<b>Figura 40</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada amostras de cristais fixados em fita condutora de carbono , perloffita.....	63
<b>Figura 41</b> - Espectro 11 com a composição química referente ao mineral perloffita.....	63
<b>Figura 42</b> - Espectro 12 com a composição química referente ao mineral perloffita.....	64
<b>Figura 43</b> - Espectro 13 com a composição química referente ao mineral perloffita.....	64
<b>Figura 44</b> - Cristais escalenoédricos de rodocrosita sobre matriz de perloffita e siderita.....	66

<b>Figura 45</b> - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada amostras de cristais fixados em fita condutora de carbono , rodocrosita. ....	66
<b>Figura 46</b> - Espectro 1 com a composição química referente ao mineral rodocrosita. ....	67
<b>Figura 47</b> - Espectro 2 com a composição química referente ao mineral rodocrosita. ....	67
<b>Figura 48</b> - Espectro 3 com a composição química referente ao mineral rodocrosita. ....	68

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação dos minerais, LSC-07. ....	40
<b>Tabela 2</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação dos minerais, LSC-14 .....	43
<b>Tabela 3</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação dos minerais, LSC-22. ....	45
<b>Tabela 4</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação de minerais, LSC-26 .....	47
<b>Tabela 5</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação de minerais, LSC-27. ....	49
<b>Tabela 6</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação de minerais, LSC-67. ....	55
<b>Tabela 7</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação do mineral, switzerita.....	61
<b>Tabela 8</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação do mineral, perloffita. ....	65
<b>Tabela 9</b> - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação do mineral, rodocrosita. ....	68

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
1.1	Apresentação	14
1.2	Justificativa do Estudo	15
1.3	Objetivos	15
1.4	Localização e vias de acesso	15
1.5	Materiais e Métodos	16
1.5.1	Revisão Bibliográfica	16
1.5.2	Preparação de Amostras, Descrição Macroscópica e Microscópica	17
1.5.3	Microscopia Eletrônica de Varredura / Espectrometria de Energia Dispersiva – MEV/EDS	17
1.5.4	Tratamento dos dados da Microscopia Eletrônica de Varredura/ Espectrometria de Energia Dispersiva	18
1.5.5	Desenvolvimento da Monografia	19
<b>2</b>	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL</b>	20
2.1	Contexto Geológico da Província Ígnea do Alto Paranaíba	20
2.2	O Complexo Alcalino-Carbonatito de Serra Negra	22
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	26
3.1	Introdução	26
3.2	Classificação dos Carbonatitos	26
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b>	28
4.1	Descrição Petrográfica em Lâmina Delgada Polida	28
4.1.1	Carbonatos	30
4.1.2	Flogopita	31
4.1.3	Quartzo	31
4.1.4	Apatita	32

4.1.5 Clorita.....	33
4.1.6 Rutilo.....	34
4.1.7 Plagioclásio .....	35
4.1.8 Microclina .....	36
4.2 Análises químicas por MEV-EDS .....	37
4.2.1 Lâmina LSC-07 .....	37
4.2.2 Lâmina LSC-14 .....	40
4.2.3 Lâmina LSC-22 .....	44
4.2.4 Lâmina LSC-26 .....	45
4.2.5 Lâmina LSC-27 .....	48
4.2.6 Lâmina LSC-67 .....	49
4.2.7 Outros Minerais.....	58
4.2.8 Switzerita.....	58
4.2.9 Perloffita.....	61
4.2.10 Rodocrosita .....	65
<b>5 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A província ígnea do Alto Paranaíba (APIP), reconhecida por sua relevância geológica e mineralógica, destaca-se como uma das maiores acumulações de rochas alcalinas ultrapotássicas do planeta, abrangendo o oeste de Minas Gerais e o sudeste de Goiás. Com formações que datam do Cretáceo Superior, essa região abriga complexos alcalino-carbonatíticos como o de Serra Negra (Gibson *et al.* 1995),( Gibson *et al.* 1997) e Brod *et al.* (2005). As rochas dessa província, incluindo as formações de carbonatito e foscorito, têm se mostrado ricas em recursos minerais importantes como Nb, Ba, Ti, ETR, Sr e P, relevantes não apenas do ponto de vista geológico, mas também econômico.

Segundo Grasso (2010), essas rochas ocorrem de várias maneiras, incluindo diques, pipes, veios, diatremas e complexos plutônicos, além de lavas e materiais piroclásticos. Na região, predominam os magmas kamafugíticos, com também algumas ocorrências de magmas kimberlíticos e lamproíticos. Nos complexos alcalino-carbonatíticos, como Catalão I e II, Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira, são encontradas rochas como flogopitito, picritos, dunitos, bebedouritos, sienitos, carbonatitos e foscoritos. A intrusão desses complexos resultou na deformação das rochas metassedimentares da Faixa Brasília, frequentemente levando à formação de estruturas dômicas.

A mina Salitre I, de propriedade da Mosaic, onde ocorre o carbonatito de Serra Negra, apresenta feições de hidrotermalismo que contribuem para a formação de uma associação mineral singular, com a predominância de fosfatos de Ba e Fe, como a vivianita e perloffita, em contraste com depósitos de fosfato mais comuns no Brasil, como os encontrados em Tapira e Araxá, que contêm principalmente fosfatos de Ca e Al, como a fluorapatita e crandallita. Esse contexto geológico propôs uma oportunidade de estudo crucial para o entendimento das gêneses e paragêneses minerais e suas potenciais aplicações na extração de fosfato, desenvolvendo o estudo e entendimento mineralógico.

O desenvolvimento deste trabalho se baseia, na pesquisa bibliográfica ampla, classificação macroscópica das amostras em relação às feições hidrotermais e de laterização e, análise das amostras realizadas em laboratórios especializados da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), utilizando técnicas como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com espectroscopia de raios-X de dispersão de energia (EDS), que se revelam fundamentais

para o reconhecimento mineralógico.

Assim, o presente projeto emerge como um importante passo para a compreensão do potencial mineralógico da Serra Negra e do papel que os processos hidrotermais e de laterização desempenham na formação de tais depósitos, com um foco no aproveitamento econômico dos recursos minerais disponíveis nesta região.

## **1.2 Justificativa do Estudo.**

Rochas alcalinas são importantes fontes de recursos minerais como Nb, Ba, Ti, ETR, Sr, P dentre outros. Na área onde está instalada a mina da Mosaic, no carbonatito de Serra Negra, a rocha apresenta feições de hidrotermalismo e de laterização, contribuindo para processos de formação de depósitos de enriquecimento supergênico. Tal sequência de alterações propiciou a formação de uma associação mineral distinta de outros depósitos de fosfato do Brasil, com a presença de fosfatos de Ba e Fe (perloffita, vivianita, dentre outros), em detrimento de fosfatos de Ca e Al (fluorapatita, crandallita) como os que ocorrem em Tapira e Araxá.

Com a realização do presente projeto, pretende-se determinar as paragêneses minerais relacionadas ao carbonatito de Serra Negra na mina da Mosaic. Os resultados podem contribuir para determinação de melhores rotas de processos para extração de fosfato nas zonas superficiais ricas em Ba e Fe, melhorando o aproveitamento econômico do depósito.

## **1.3 Objetivos**

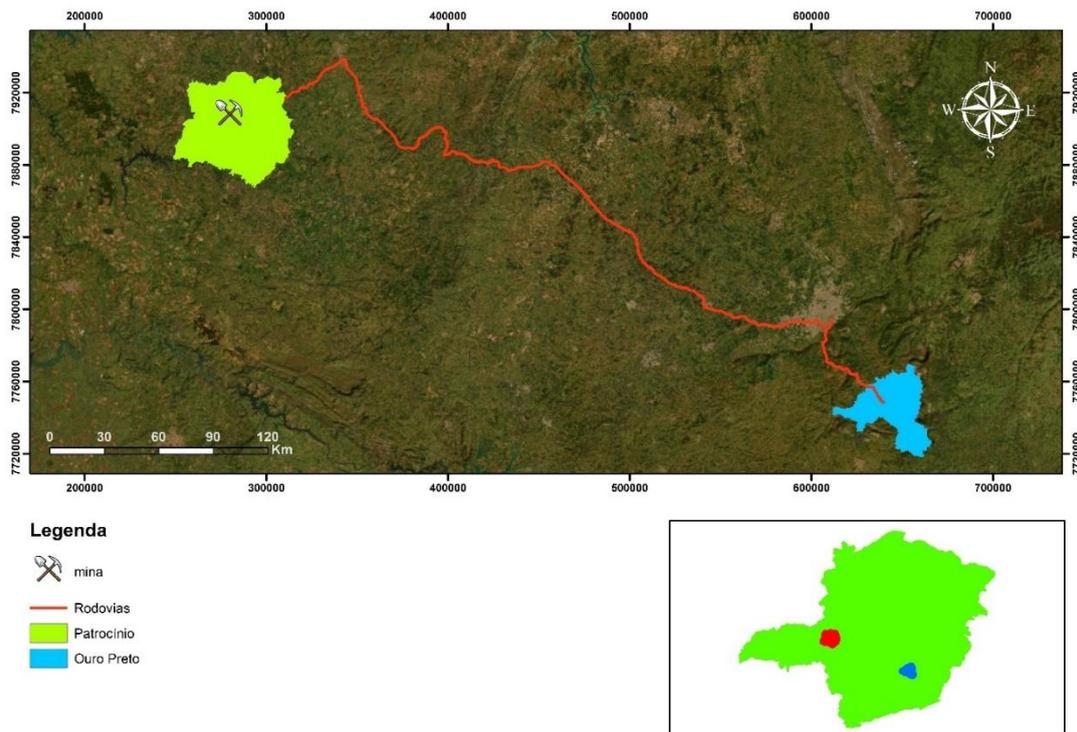
O presente trabalho tem como objetivo caracterização da mineralogia de amostras de rochas coletadas no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Serra Negra, mina da Mosaic nos depósitos de fosfato, com ênfase especial nos minerais formados como produto de alteração hidrotermal e processo de laterização. Para isso, foram identificados e descritos os minerais primários presentes na rocha por meio de análises petrográficas e mineralógicas, para minerais produto de alteração, minerais de rara ocorrência, a identificação foi feita por MEV-EDS, classificação química do mineral, determinando gêneses e paragêneses minerais.

## **1.4 Localização e vias de acesso.**

O complexo de Serra Negra se localiza a aproximadamente 503 km de Ouro Preto, MG.

O percurso é realizado pela BR-356 até Alphaville, no Condomínio Belo Horizonte, MG, onde se desloca por 20 km até acessar a BR-262, ainda no perímetro urbano de Belo Horizonte. A partir daí, segue pela BR-262 até atingir a via MG-187, que leva à Serra do Salitre, MG. Em seguida, prossegue pela via MG-230 até chegar ao município de Patrocínio, MG. Figura 1, mapa.

**Figura 1-** Mapa de Localização



**Fonte:** Elaborado pelo autor da obra utilizando o software ArcGIS, com imagem extraída e modificada do Google Earth.

## 1.5 Materiais e Métodos

### 1.5.1 Revisão Bibliográfica

Os trabalhos principais que embasam o presente estudo são: Gibson *et al.* (1995, 1997), Brod *et al.* (2005), Brod *et al.* (2004), Ribeiro (2008), Cordeiro *et al.* (2010), Machado Junior (1992), Palmieri *et al.* (2011), Mariano & Marchetto (1991), Barbosa *et al.* (2009), Seer (1999), Brod *et al.* (2003), Amaral *et al.* (1967), Gomes *et al.* (1990), Ribeiro *et al.* (2005), Le Maitre (2002), Mitchell (1986), Mitchell (2005), Woolley e Kjarsgaard (2008), Grasso (2010) e Campos *et al.* (2024).

### **1.5.2 Preparação de Amostras, Descrição Macroscópica e Microscópica.**

As amostras utilizadas no presente trabalho foram previamente coletadas pelo Prof. Ricardo Scholz, no âmbito do projeto FAPEMIG PPM-00588-18. Foram selecionadas amostras para a preparação de lâminas delgadas polidas. Além disso, foram catados cristais euédricos, utilizando-se pinça e microscópio estereoscópico. Os cristais foram fixados em fita condutora de carbono e posteriormente foram metalizados com carbono. Em seguida, tanto as lâminas delgadas polidas quanto os cristais fixados foram analisados no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), no modo EDS.

A microscopia óptica aplicada à geologia utiliza a luz visível para examinar amostras de minerais e rochas cortadas em lâminas delgadas, com espessura inferior a 0,03 mm, que permitem a transmissão da luz através da amostra. Esse tipo de microscópio é equipado com várias lentes (objetivas e oculares) e filtros, que ajudam a ampliar a imagem e a analisar as propriedades ópticas dos minerais. As amostras foram preparadas no laboratório de lâminação LAMIM do DEGEO/EM. As fotomicrografias foram geradas utilizando aparelho smartphone Asus Zenfone Max Plus M2 (ZB634KL). Foram analisadas seis lâminas delgadas polidas de identificação, LSC-07, LSC-14, LSC-22, LSC-26, LSC-27 e LSC-67, todas descritas utilizando microscópio óptico da marca Olympus BX-41, etapa esta que foi realizada nos laboratórios de Microscopia do Departamento de Geologia (DEGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

### **1.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura / Espectrometria de Energia Dispersiva – MEV/EDS.**

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento que gera imagens de alta ampliação (até 300.000 x) e resolução, usando feixes de elétrons ao invés de luz. Seu funcionamento se baseia na emissão de elétrons por um filamento de tungstênio, quando uma diferença de potencial de 0,5 a 30 KV é aplicada, acelerando os elétrons em direção a um eletrodo positivo. As lentes condensadoras ajustam o percurso dos feixes, enquanto a objetiva foca os elétrons antes de atingirem a amostra, resultando em imagens com caráter virtual.

O EDS (detector de raios-X por dispersão de energia) é um acessório crucial para a caracterização microscópica de materiais, especialmente em geociências. Ele funciona em conjunto com o MEV (microscópio eletrônico de varredura), onde o feixe de elétrons excita os elétrons externos dos átomos em um mineral. Ao retornarem aos seus níveis energéticos, esses elétrons liberam energia em forma de raios-X. O EDS mede essa energia, permitindo a

identificação dos elementos químicos presentes em pontos específicos da amostra, com uma resolução de até 5  $\mu\text{m}$ .

O equipamento fornece a composição química de cada uma das fases minerais presentes na amostra, complementando a caracterização feita pelo MEV com informações sobre a distribuição espacial dos elementos químicos. Isso é especialmente importante, pois alguns elementos podem estar presentes em minerais de dimensões muito pequenas, que poderiam não ser identificados na microscopia óptica. A imagem gerada apresenta variações em tons de cinza, onde os tons mais escuros correspondem a elementos com massa atômica mais baixa, enquanto os tons mais claros refletem elementos de massa e densidade atômica superiores.

Essa característica permite não apenas mapear a composição de um mineral específico por meio do gradiente de tons de cinza, mas também compará-lo com minerais vizinhos já analisados opticamente, facilitando a identificação de minerais em soluções sólidas. O conjunto do MEV e EDS fornece, portanto, imagens virtuais e identificação da química mineral de forma pontual.

As amostras, LSC-07, LSC-14, LSC-22, LSC-26, LSC-27 e LSC-67 foram metalizadas, processo em que se deposita uma fina camada de metal condutor sobre a amostra antes de analisá-la no (MEV). Esse procedimento é necessário principalmente para evitar carregamento elétrico em materiais isolantes e melhorar a qualidade das imagens. Após a preparação, as amostras foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) no modo EDS do fabricante JEOL modelo JSM-6510 pertencente ao Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic) da UFOP.

O MEV está equipado com um espectrômetro de energia dispersiva de raios-X (EDS) do fabricante Oxford, que possibilita a análise química semiquantitativa de amostras sólidas. Foram realizadas análises em todas as lâminas, LSC-07, LSC-14, LSC-22, LSC-26, LSC-27 e LSC-67. As análises no MEV foram conduzidas com aceleração de voltagem de 20 kV, distância de trabalho (WD) entre 14 e 15 mm e tamanho do ponto (SS) de 68. Para a identificação das fases minerais, foi utilizado o programa de identificação do banco de dados do site mindat.org<sup>1</sup>

#### **1.5.4 Tratamento dos dados da Microscopia Eletrônica de Varredura/ Espectrometria de Energia Dispersiva.**

O MEV-EDS fornece os dados em forma de % em massa de óxidos. Para converter a

massa e óxidos em elementos puros, utiliza-se as massas molares, abaixo as etapas de conversão:

➤ **Calcular a Massa Molar do Óxido:**

Massa molar do óxido =  $\sum$  (massa atômica do elemento  $\times$  número de átomos de cada elemento).

➤ **Converter % de Massa do Elemento para Mols:**

Mols do elemento = % massa do elemento / massa atômica do elemento.

➤ **Normalizar os Mols:**

N = Mols do elemento / menor valor de mol de elementos da amostra.

➤ **Obter a Unidade de Fórmula:**

Os números resultantes da normalização representam os coeficientes estequiométricos da unidade de fórmula da substância. Isso fornece as razões molares de cada elemento em sua forma atômica, e não como óxidos.

Por fim, a fórmula é ajustada com base na estrutura cristalina do mineral.

### 1.5.5 Desenvolvimento da Monografia.

Após a revisão bibliográfica, a análise, a descrição e a interpretação dos dados, tornou-se possível a elaboração de uma monografia estruturada da seguinte forma: uma introdução que caracteriza a geologia regional e os métodos analíticos, seguida pela apresentação e discussão dos resultados, e encerrando com a conclusão.

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.mindat.org/chemsearch.php>.

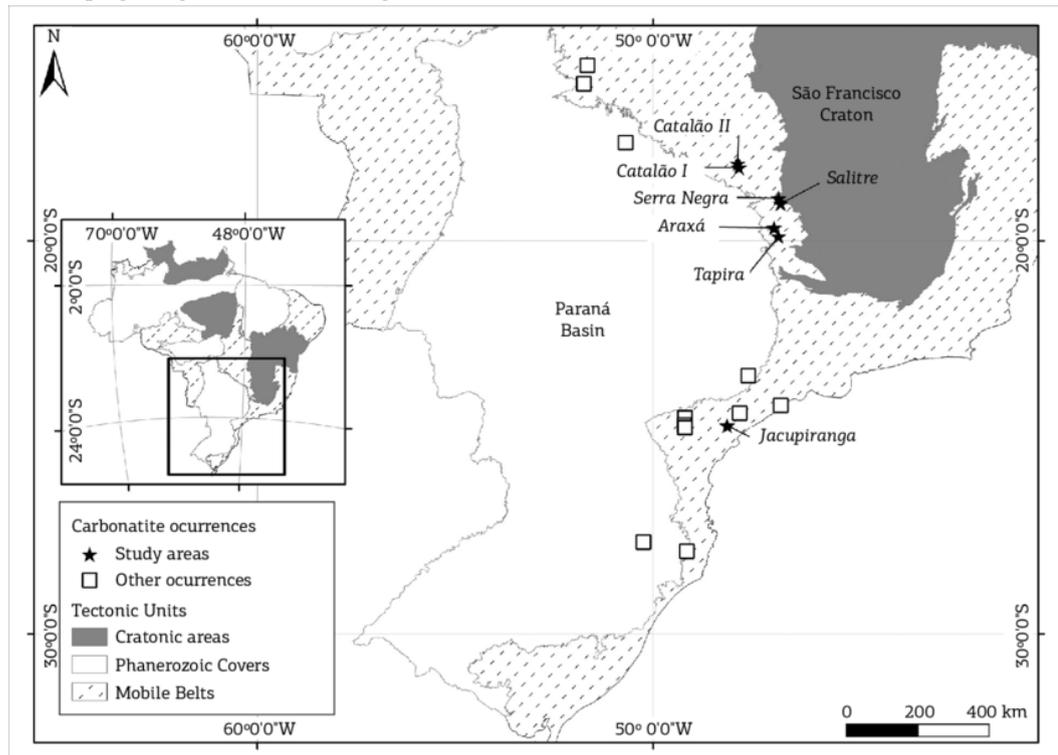
## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

### 2.1 Contexto Geológico da Província Ígnea do Alto Paranaíba

A Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP), conforme descrito por Gibson *et al.* (1995, 1997) e Brod *et al.* (2005) é consequência do magmatismo do Cretáceo Superior, por volta de 85 Ma, na região das fronteiras norte e nordeste da Bacia do Paraná, associado ao efeito da pluma do manto Trindade na litosfera subcontinental, Figura 2. A Província foi delineada ao longo de uma estrutura alongada na direção NW-SE conhecida como Arco Alto Paranaíba. As rochas desse contexto apresentam características alcalinas e estão ligadas a formações pré-cambrianas localizadas nas zonas interna e externa da Faixa de Dobramentos Brasília. O Arco homônimo localiza-se a oeste de Minas Gerais e o sudeste de Goiás. A APIP é considerada uma das províncias ultrapotássicas mais volumosas do mundo, abrigando um grande número de rochas alcalinas máficas e ultramáficas, Gibson *et al.* (1995).

Essas rochas ocorrem sob diversas formas, incluindo diques, pipes, veios, diatremas e complexos plutônicos, além de lavas e piroclásticas. Os magmas presentes na região são predominantemente kamafugíticos, com ocorrências de magmas kimberlíticos e lamproíticos. Nos complexos alcalino-carbonatíticos, como Catalão I e II, Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira, encontram-se rochas como flogopitito picritos, dunitos, bebedouritos, sienitos, carbonatitos e foscoritos, Grasso (2010). A intrusão desses complexos ocasionou a deformação das rochas metassedimentares da Faixa Brasília, frequentemente resultando na formação de estruturas dômicas de acordo com Grasso (2010).

**Figura 2** - Mapa geológico da Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP).



**Fonte:** Complexos alcalino-carbonatíticos a nordeste e leste da Bacia do Paraná, modificados de Oliveira *et al.* (2004) e Wooley e Kjarsgaard (2008), por Gomide *et al.* (2016).

O Complexo Catalão I é constituído por dunitos, clinopiroxenitos, bebedouritos, carbonatitos, foscoritos, nelsonitos e flogopititos. Sua formação ocorreu a partir de magma de flogopita-picrito passando vários estágios de cristalização fracionada e imiscibilidade líquida. A magnesiocarbonatita é o tipo carbonatito predominante, segundo descrito por Brod *et al.* (2004), Ribeiro (2008) e Cordeiro *et al.* (2010).

De acordo com Machado Junior (1992), Catalão II é constituído por piroxenita, quartzo-sienito, sienito alcalino-feldspato, calciocarbonatito, silicocarbonatita, lamprófito e flogopitito. Neste complexo os calciocarbonatitos são predominantes em relação aos magnesiocarbonatitos. Palmieri *et al.* (2011) destacam que, na série fosforita, a porção norte do complexo é dominado por fosforita, enquanto a porção sul é caracterizada por nelsonita.

Salitre é composto por três corpos, (Salitre I, II e III) localizados ao sul do Complexo Serra Negra. No complexo incluem bebedouritos, dunitos, perovskititas, tinguitos, traquitos, foscoritos, apatita-carbonatitos, calciocarbonatita, magnesiocarbonatitos e fenitos, conforme descrito por Mariano & Marchetto (1991), Brod *et al.* (2004) e Barbosa *et al.* (2009).

Segundo Seer (1999), o complexo Araxá é composto por carbonatitos, foscoritos e flogopititos metassomáticas derivadas de rochas ultramáficas. Magnesiocarbonatito e o

carbonatito são dominantes neste complexo. A intrusão gerou uma cúpula estrutura em xistos e quartzitos do Grupo Ibiá.

Descrito por Brod *et al.* (2003), o complexo Tapira tem a forma elíptica, e é composto de bebedourito, carbonatito, sienita, e raros melilitolitos e dunitos, todos cortados por diques ultramáficos de afinidade kamafugita. O calciocarbonatita predomina sobre o magnesiocarbonatito.

## 2.2 O Complexo Alcalino-Carbonatito de Serra Negra

Grasso (2010), o Complexo de Serra Negra, situado imediatamente ao norte das intrusões de Salitre I, II e III, na região de Patrocínio, Minas Gerais, caracteriza-se como um domo circular com aproximadamente 10 km de diâmetro, alojado em quartzitos do Grupo Canastra. Segundo Mariano & Marchetto (1991), o complexo é descrito como sendo composto por um núcleo central de calciocarbonatito, com diâmetro estimado de 4.5 km, frequentemente contendo mais de 20% de apatita e até 5% de dolomita, com quantidades acessórias de flogopita, magnetita, humita, rutilo, pirocloro, baddeleyta, pirrotita e pirita.

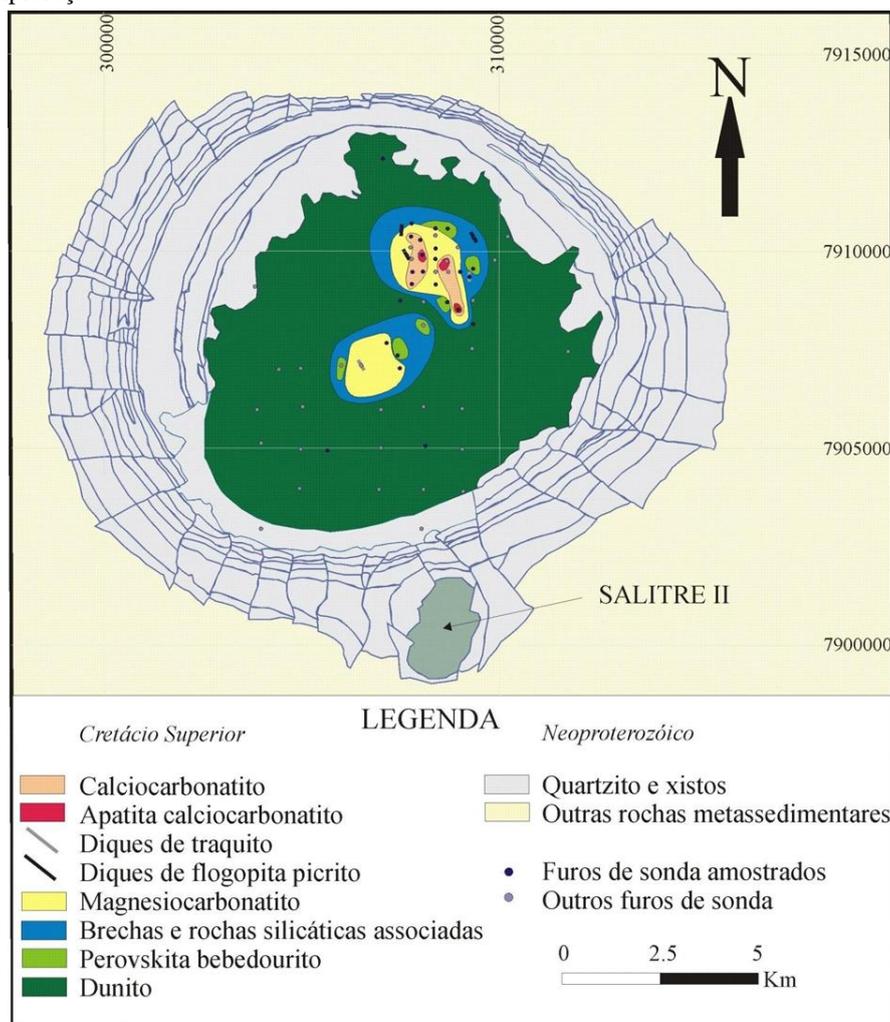
Estudos realizados por Amaral *et al.* (1967) obtiveram idades de 83,7 e 83,4 Ma em biotita de Peridotito nas primeiras análises geocronológicas, enquanto Gomes *et al.* (1990) compilaram idades K/Ar em torno de 83 Ma. Segundo Brod *et al.* (2004), há um corpo carbonatítico/foscorítico central, envolvido por uma zona de bebedourito composta por diopsídio, flogopita, magnetita, perovskita, apatita, calcita e, subordinadamente, ilmenita. No complexo a norte e nordeste ocorrem Dunitos e Peridotitos.

A série bebedourítica apresenta uma estrutura acamadada, com variações modais comuns, incluindo zonas de concentração de apatita ou de magnetita e perovskita. Essas zonas foram descritas por Mariano e Marchetto (1991) como apresentando características tanto concordantes (estratos) quanto discordantes (diques). Diques de flogopita picritos foram observados cortando dunitos na porção norte do complexo, conforme descrito por Gibson *et al.* (1995). Os únicos efeitos de contato observados no complexo são a silificação da rocha encaixante, e não foram encontrados fenitos ou indicações de metassomatismo alcalino na encaixante regional.

Grasso (2010), as partes mais elevadas da estrutura dômica são formadas por múltiplos anéis concêntricos de quartzitos, enquanto as depressões entre os anéis são ocupadas por folhelhos, que são mais suscetíveis à erosão.

A Figura 3 ilustra um mapa geológico esquemático do complexo de Serra Negra, baseado em dados obtidos a partir da análise de testemunhos de sondagem, caracterizações petrográficas e interpretações geoquímicas, estudo e mapa desenvolvidos por Grasso (2010). Devido ao fato de que todos os complexos da APIP são cobertos por espessas camadas de laterita que podem ultrapassar 200 m de espessura, torna-se praticamente inviável o acesso a afloramentos superficiais e contínuos de amostras frescas. No entanto, os complexos de Catalão I e II, Araxá e Tapira oferecem boas exposições nas frentes de lavra de nióbio e fosfato, enquanto isso não se verifica no domo de Serra Negra, onde os afloramentos são extremamente raros. Na região noroeste do domo, é possível encontrar apenas alguns afloramentos de dunitos serpentinizados, Grasso (2010).

**Figura 3** - Mapa geológico esquemático do complexo de Serra Negra, com base em testemunhos de sondagem e dados de exploração.



**Fonte:** De Grasso (2010).

Segundo Grasso (2010) os dunitos constituem aproximadamente 70% do complexo e se estendem desde a interface com o quartzito que os rodeia até regiões próximas ao núcleo do domo. Eles são formados por cumulus finos, predominantemente compostos de olivina, e contêm também magnetita, flogopita, uma quantidade reduzida de carbonato intercumulus, além de produtos de alteração como serpentina e clinohumita.

Grasso (2010) encontram-se duas intrusões de magnesiocarbonatito na porção central e norte do complexo. A intrusão central é composta por grandes quantidades de cumulos grossos de dolomita, com magnetita, flogopita e, barita. A intrusão setentrional é constituída por dois tipos de magnesiocarbonatito: o primeiro constituído de cumulos médios a grossos de dolomita, e o segundo, em diques de magnesiocarbonatito fino, quase monominerálico, com quantidades subordinadas de magnetita e flogopita.

Segundo Grasso (2010), o alojamento dos magnesiocarbonatitos resultou na formação de auréolas de brecha nos dunitos encaixantes. A maior parte das brechas é constituída por veios e diques de carbonatito que atravessam a rocha silicática, a qual se transformou em flogopitito. As brechas polimíticas, por sua vez, são menos comuns e são compostas por fragmentos angulosos de tamanhos variados, predominantemente de dunitos e bebedouritos, em uma matriz que consiste majoritariamente de carbonato. Essa formação está associada a um padrão explosivo de intrusão carbonatítica. A atividade explosiva dentro da câmara foi identificada por Ribeiro *et al.* (2005) no complexo de Catalão I e parece ser uma característica frequente nos complexos da APIP.

Grasso (2010), na intrusão norte, foram identificados magnesiocarbonatitos associados a cumulos foscóricos restritos, compostos por apatita, carbonatos, magnetita e tetra-ferriflogopita. Dentro dessa intrusão, duas áreas foram definidas, caracterizadas pela presença predominante de veios e diques de calciocarbonatitos. Essas zonas contêm calciocarbonatitos de grão uniforme e fino, apresentando também tetra-ferriflogopita e magnetita, que podem exibir um bandamento distinto formado por magnetita e tetra-ferriflogopita

Segundo Grasso (2010), os calciocarbonatitos incluem áreas com alta concentração de apatita, conhecidas como apatita calciocarbonatitos. Essas rochas se caracterizam por um bandamento difuso e uma textura granular hipidiomórfica, sendo compostas principalmente de carbonatos e apatita, além de conterem magnetita e flogopita/tetra-ferriflogopita. É possível também encontrar olivina, bem como quantidades menores de piritita, pirrotita e pirocloro. A apatita geralmente se agrupa em bandas irregulares de espessura centimétrica, enquanto a olivina é encontrada apenas dentro dessas bandas.

Grasso (2010), em determinadas regiões, as apatitas calciocarbonatitos podem transitar

gradualmente para os cumulos foscoríticos. Essas transições, que geralmente apresentam dimensões decimétricas, podem se estender por vários metros. Os cumulos foscoríticos são compostos por apatita, carbonato, magnetita e tetra-ferriflogopita, sendo que o pirocloro aparece de forma acessória. A textura predominante é granular hipidiomórfica, com a apatita e, posteriormente, a magnetita atuando como fases cumulus. A tetra-ferriflogopita pode variar de fina a grosseira e possui uma forma subédrica, enquanto o carbonato pode aparecer como intercumulus ou em bolsões irregulares de tamanho centimétrico.

Segundo Grasso (2010), foram registradas diversas ocorrências de bebedourito nas bordas das intrusões de magnesiocarbonatitos. Essas rochas se caracterizam por uma textura granular hipidiomórfica de granulação grossa, frequentemente pegmatítica, e contêm olivina e perovskita como minerais cumulus, além de flogopita e magnetita como minerais intercumulus.

Grasso (2010), os traquitos e sienitos aparentam ser volumetricamente pouco significativos. Os diques de traquito porfirítico, com espessura que varia de centímetros a decímetros, interrompem tanto a intrusão central de magnesiocarbonatito quanto as brechas adjacentes à intrusão do magnesiocarbonatito ao norte. Esses diques são constituídos por fenocristais de K-feldspato e biotita, além de conter biotita e magnetita em sua matriz.

Segundo Grasso (2010), os diques de flogopita picritos, que variam de centímetros a decímetros de espessura, cruzam tanto a intrusão setentrional de magnesiocarbonatitos quanto sua auréola de brechas. Esses diques são compostos por fenocristais milimétricos de olivina e flogopita, inseridos em uma matriz de granulação fina de coloração cinza escura, predominantemente formada por flogopita, carbonatos, perovskita e minerais opacos. A estrutura deles é em geral maciça.

### 3 ESTADO DA ARTE

#### 3.1 Introdução

A classificação dos carbonatitos desempenha um papel essencial na compreensão de sua evolução ao longo do tempo, assim como na adoção dos conceitos e definições atualmente aceitos. Para compreender as rochas que constituem o complexo em estudo, é fundamental adotar uma abordagem que aborde desde a formação dos carbonatitos até sua classificação e os processos de origem, culminando na definição da série petrogenética identificada em Serra Negra.

#### 3.2 Classificação dos Carbonatitos

De acordo com Le Maitre (2002), os carbonatitos baseados na classificação do sistema de rochas ígneas estabelecida pela União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS), são definidos como rochas que contêm mais de 50% de carbonato modal primário, e menos de 20% de sílica.

Segundo Mitchell (1986), carbonatitos são rochas que possuem um teor de carbonato superior a 30%, sem levar em conta o teor de sílica. Portanto, o mais importante é a suíte de rochas a ser originada do mesmo magma, não somente a proporção do mineral que os compõe.

De acordo com Le Maitre (2002), as rochas carbonatíticas que contêm mais de 50% de carbonatos podem ser classificadas nas seguintes categorias:

1. Calcita Carbonatito: caracterizada pela presença de calcita como mineral predominante. Se a rocha tiver uma textura grossa, pode ser denominada de "søvito"; se a textura for média a fina, recebe o nome de "alvikito".
2. Dolomita Carbonatito: nesta categoria, o mineral carbonático dominante é a dolomita, sendo também referida como "beforsito".
3. Ferrocarbonatito: este tipo é caracterizado por sua riqueza em ferro no mineral carbonático.
4. Natrocarbonatito: composto principalmente por carbonatos de sódio, potássio e cálcio, este tipo de rocha é atualmente encontrado apenas na ocorrência vulcânica de Oldoinyo Lengai, na Tanzânia.

Segundo Mitchell (2005), um conjunto de rochas, que mesmo com diferenças em sua composição modal, mas tem uma origem magmática compartilhada, pode assim ser definido como um complexo carbonatítico.

Woolley e Kjarsgaard (2008) propuseram a divisão dos carbonatitos mundiais em oito classes, conforme o tipo de rocha alcalina associada: 1. Carbonatitos associados a melilitito (ou melilitolito), 2. Carbonatitos associados a nefelinito (ou ijolito), 3. Carbonatitos associados a basanita (ou gabro alcalino), 4. Carbonatitos associados a fonolito (ou feldspatóide sienito), 5. Carbonatitos associados a traquito (ou sienito), 6. Carbonatitos associados a kimberlito, 7. Carbonatitos associados a lamprófito (tipicamente aillikito, alnoito), 8. Carbonatitos isolados.

Grasso (2010), os carbonatitos contêm diversos minerais, incluindo carbonatos, óxidos/hidróxidos, silicatos, fosfatos, sulfetos e sulfatos. Dentre esses, alguns dos mais predominantes são a calcita, dolomita, ankerita, magnetita, ilmenita, pirocloro, flogopita, olivina, apatita, monazita, pirita, pirrotita, calcopirita e barita.

Segundo Grasso (2010), certos minerais exibem substituições isomórficas que são características dessa associação, como a série entre flogopita e tetra-ferriflogopita, que se forma em condições de baixas concentrações de alumínio, comuns em carbonatitos. A ilmenita proveniente de carbonatitos tende a ter altos teores de Nb e Mn, enquanto a olivina, por sua vez, é geralmente pobre em Ni e apresenta concentrações elevadas de Mg e Mn.

Grasso (2010), os carbonatos encontrados em carbonatitos frequentemente apresentam elevadas concentrações de estrôncio (Sr) e bário (Ba). Em particular, os carbonatitos vulcânicos que estão preservados, como os do vulcão Ol Doinyo Lengai, são conhecidos pela presença de carbonatos alcalinos, incluindo a gregoryita -  $(\text{Na}_2, \text{K}_2, \text{Ca})\text{CO}_3$  - e a nyerereita -  $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ . Além disso, a apatita costuma ter níveis consideráveis de silício (Si), sódio (Na) e elementos de terras raras (ETR).

## **4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 Descrição Petrográfica em Lâmina Delgada Polida**

Os estudos petrográficos envolveram a descrição microscópica de seis lâminas delgadas polidas feitas a partir de amostras coletadas pelo orientador no Complexo Alcalino-Carbonatito de Serra Negra, Mina da Mosaic, localizada na cidade de Patrocínio-MG, sendo uma dessas amostras um carbonatito, como mostra a Figura 1.

A partir da amostra do carbonatito, foi confeccionada uma lâmina delgada polida de identificação LSC-67, que foi adicionada ao estudo com as cinco demais lâminas de identificação, LSC-07, LSC-14, LSC-22, LSC-26 e LSC-27, que já se encontravam prontas para o estudo. Com base na amostra do carbonatito e na lâmina de identificação LSC-67, foi possível obter informações sobre a mineralogia principal desse carbonatito e sua textura, assim, auxiliando na classificação e interpretação litológica, bem como processos de mineralização ocorridos na sua formação. Amostra do carbonatito é de uma rocha maciça, leucocrática, fanerítica, holocristalina, com textura que varia de granulação de média a grossa, inequigranular. Sua cor varia desde um cinza esbranquiçado a rosa com porções cinzas e esverdeado, como ilustra a Figura 4.

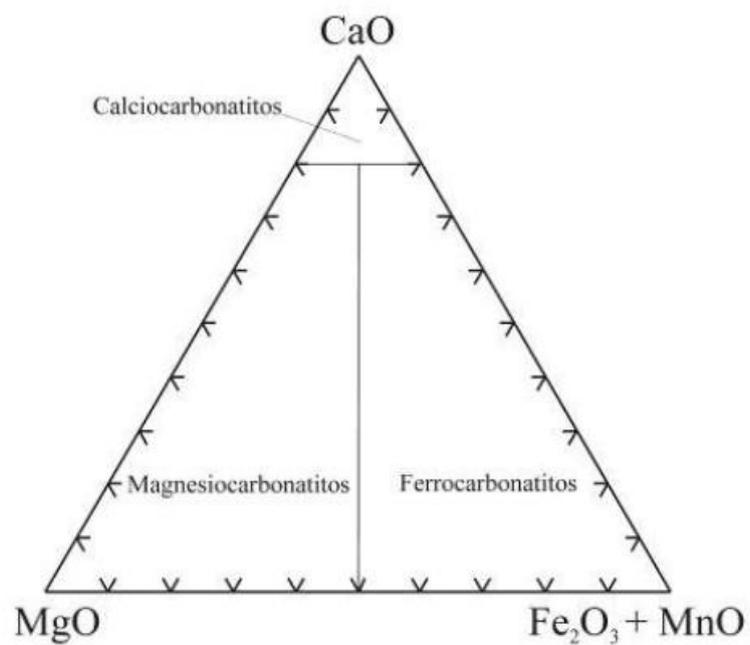
Sua mineralogia principal é composta por carbonatos 90%, flogopita 2%, minerais opacos 8%. Woolley e Kempe (1989) recomendam a utilização de critérios químicos para classificar os carbonatitos conforme o diagrama da Figura.

**Figura 4** - Representação macroscópica do Carbonatito .



**Fonte:** Amostra cedida pelo orientador.

**Figura 5** - Diagrama de classificação química para carbonatitos de Woolley e Kempe ( 1989).



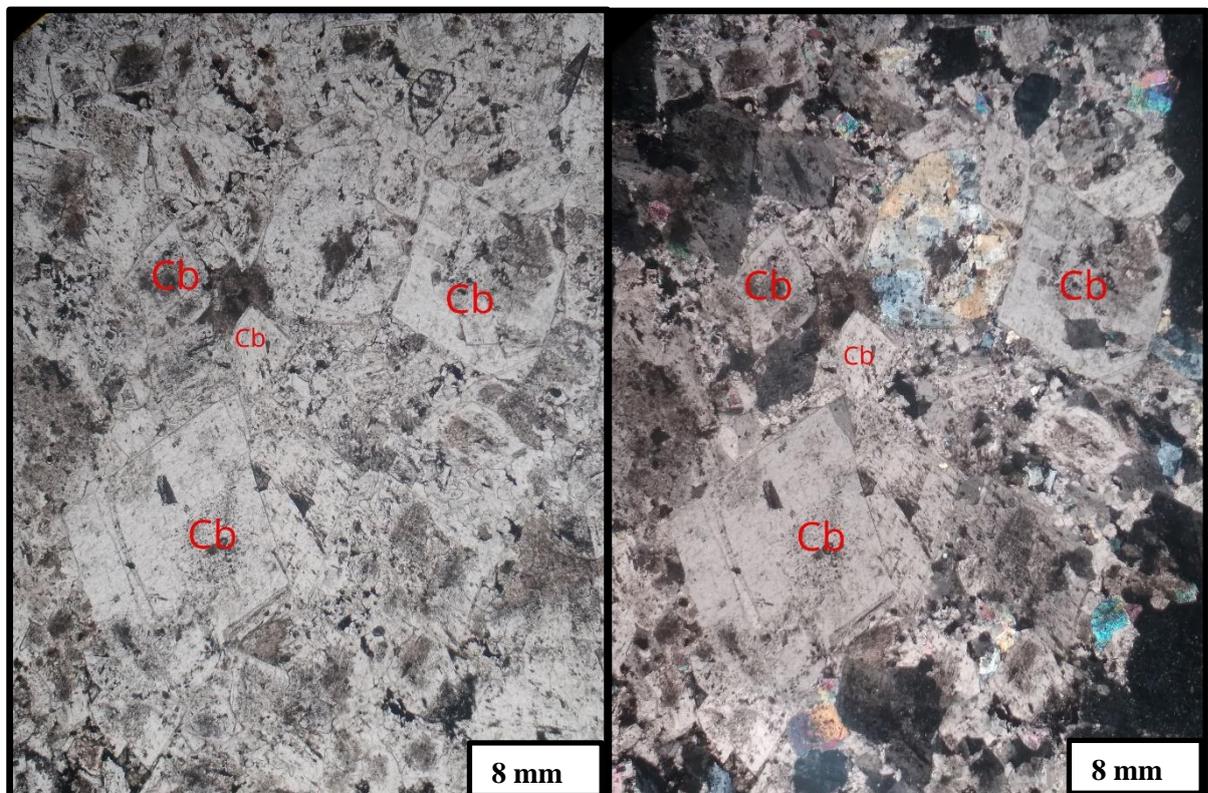
**Fonte:** Extraído e modificado de rc.unesp.br.

Na descrição petrográfica das lâminas de identificação, LSC-07, LSC-14, LSC-22, LSC-26 e LSC-27 foram observadas feições de hidrotermalismo e laterização, e encontrados os minerais quartzo, apatita, clorita, rutilo, plagioclásio sódico (albita) e feldspato potássico (microclina). Estes minerais, somados aos identificados na lâmina LSC-67, compõe toda descrição feita na microscopia óptica luz transmitida, luz plano polarizada.

#### 4.1.1 Carbonatos

Os carbonatos, à luz plano polarizada apresentam cristais com faces euédricas a subédricas. O tamanho dos cristais varia entre 1,5 a 8,0 mm, variando de incolor a uma coloração creme acizentado, relevo moderado, clivagem romboédrica perfeita. Com os polarizadores cruzados, é possível ver o hábito romboédrico, apresentam cor de interferência esbraquiçada de ordem superior. A birrefringência é alta, variando de (0,176 a 0,181), Figura 6.

**Figura 6** – Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, carbonatos à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-67.

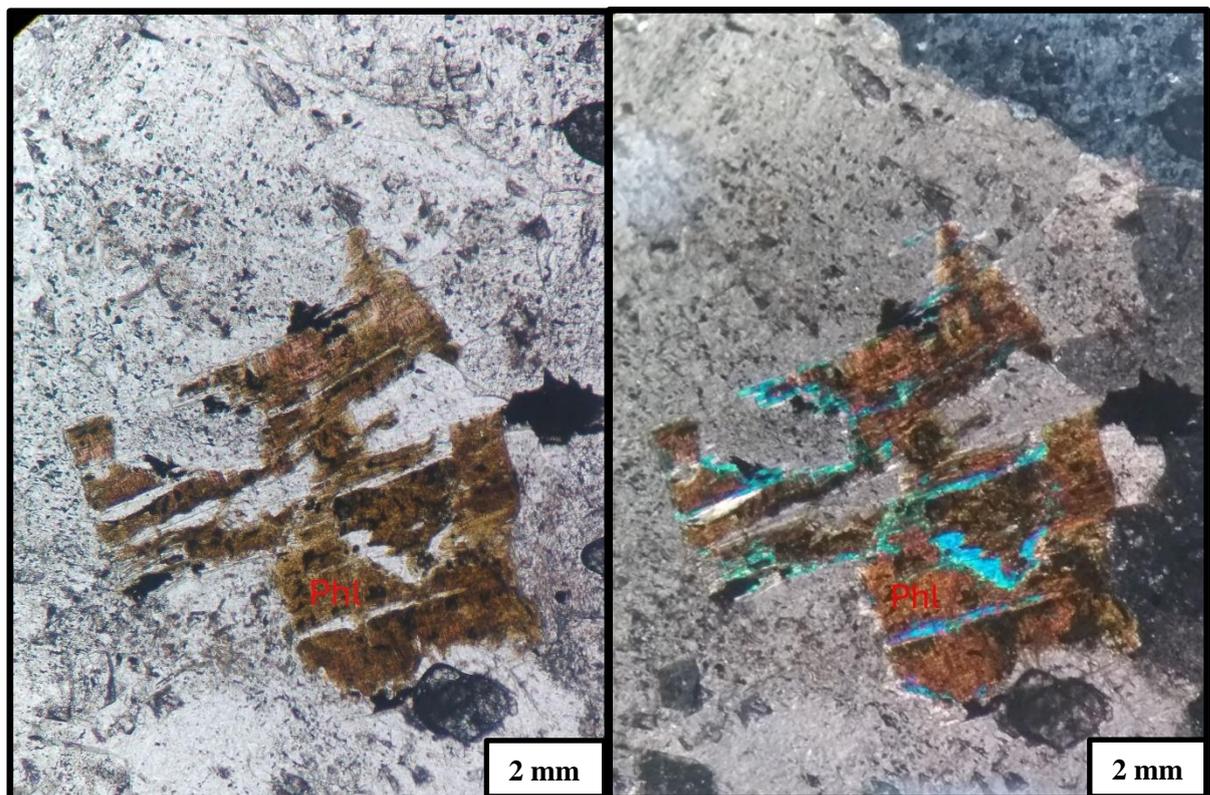


Fonte: Autor da obra.

### 4.1.2 Flogopita

O mineral flogopita no centro da imagem, à luz plano polarizada, apresenta-se bem alterado, cor acastanhada. Observam-se irregularidades nas faces do mineral, evidenciando seu processo de alteração e de seu hábito tabular. O grão é anédrico, tamanho de 2,0 mm, relevo moderado. Com os polarizadores cruzados, apresenta um processo de alteração que, se for hidratada, é alterada para vermiculita, clorita se tiver muita água no ambiente ou substituída por biotita. As cores de interferência são de terceira ordem. A birrefringência é moderada, de (0,030 a 0,045), Figura 7.

**Figura 7** - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, mineral de flogopita à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-67.



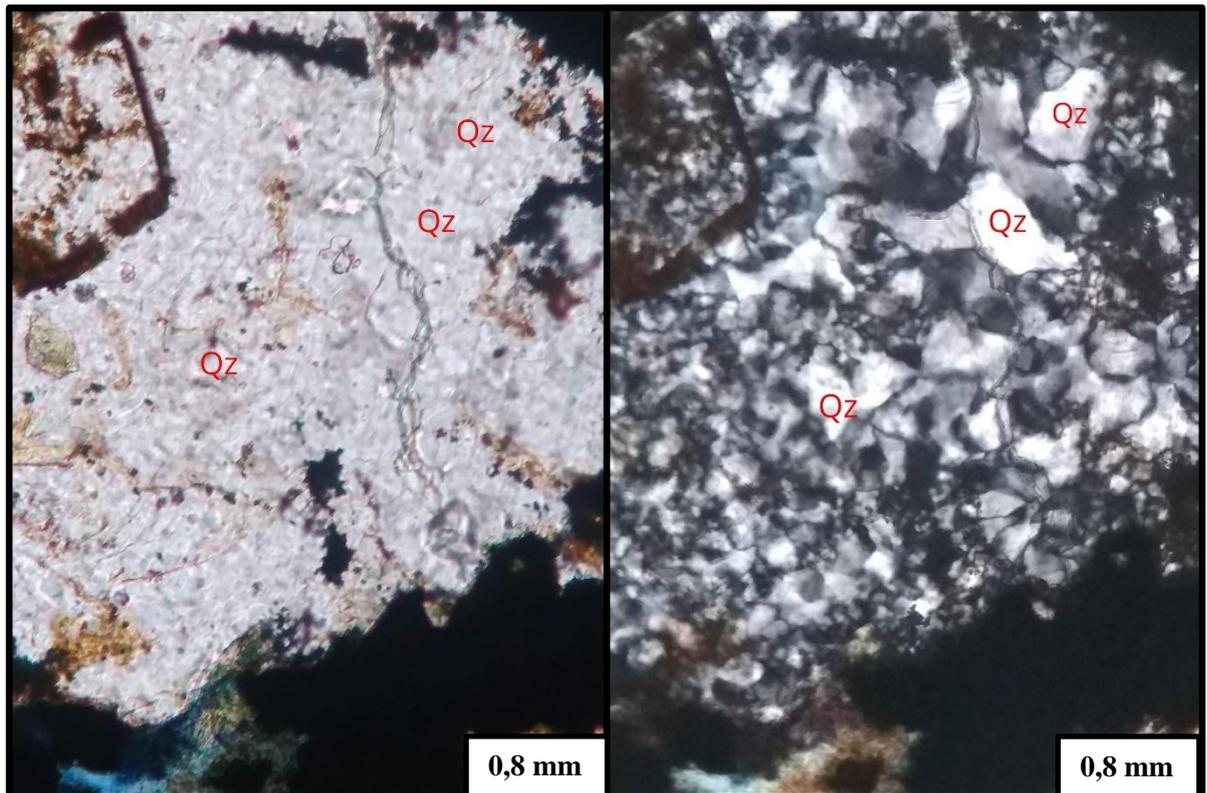
Fonte: Autor da obra.

### 4.1.3 Quartzo

Os minerais de quartzo no centro da imagem, à luz plano polarizada, são incolores, apresentam relevo baixo, com algumas fraturas. Com os polarizadores cruzados, apresentam

cor de interferência de primeira ordem, grãos anédricos, e os tamanhos dos grãos variam de 0,3 a 0,8 mm. A birrefringência é baixa, de aproximadamente (0,008), uniaxial positivo, Figura 8.

**Figura 8** - Fotomicrografia com objetiva de aumento 10x, minerais de quartzo à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-22.

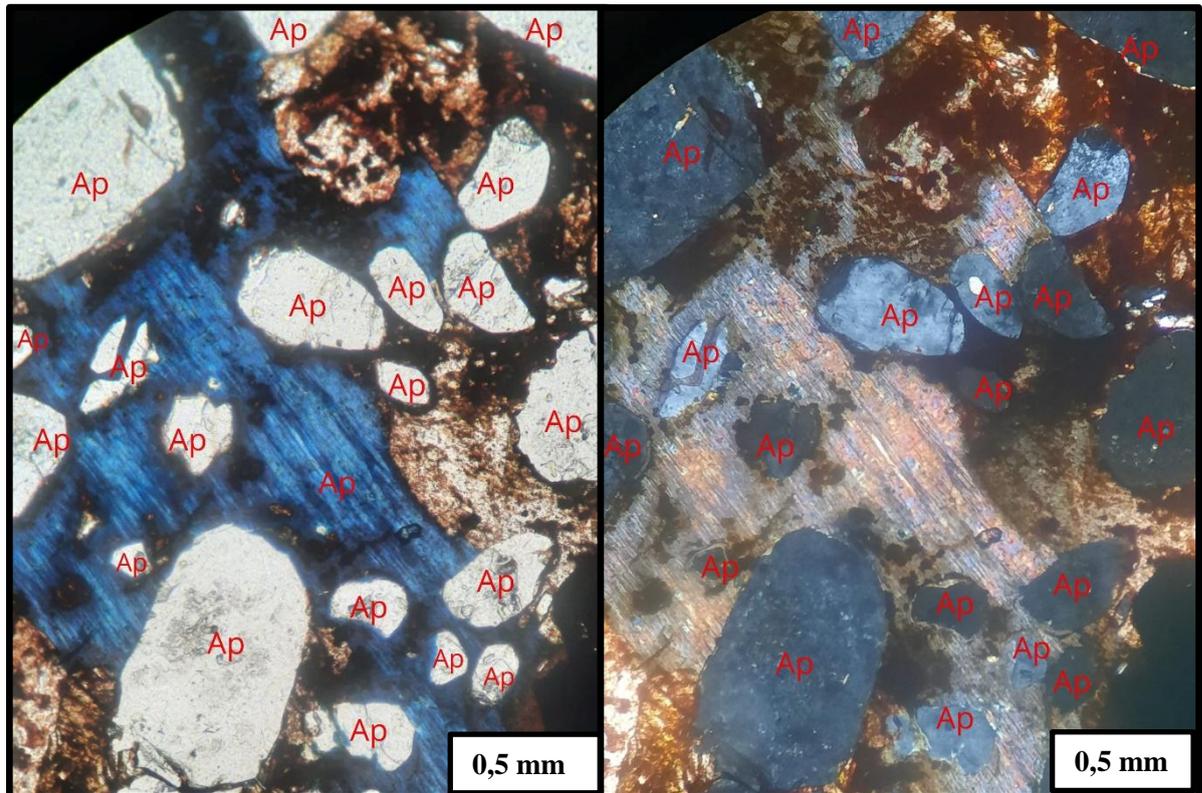


Fonte: Autor da obra

#### 4.1.4 Apatita

Os minerais de apatita no centro da imagem à luz plano polarizada são incolores, apresentam relevo moderado. Com os polarizadores cruzados, possuem cor de interferência cinza de primeira ordem, apresentam grãos anédricos, e o tamanho dos grãos varia de 0,05 a 0,5 mm. A birrefringência é baixa (0,002 a 0,004), Figura 9.

**Figura 9** - Fotomicrografia com objetiva de aumento 20x, minerais de apatita à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-14.

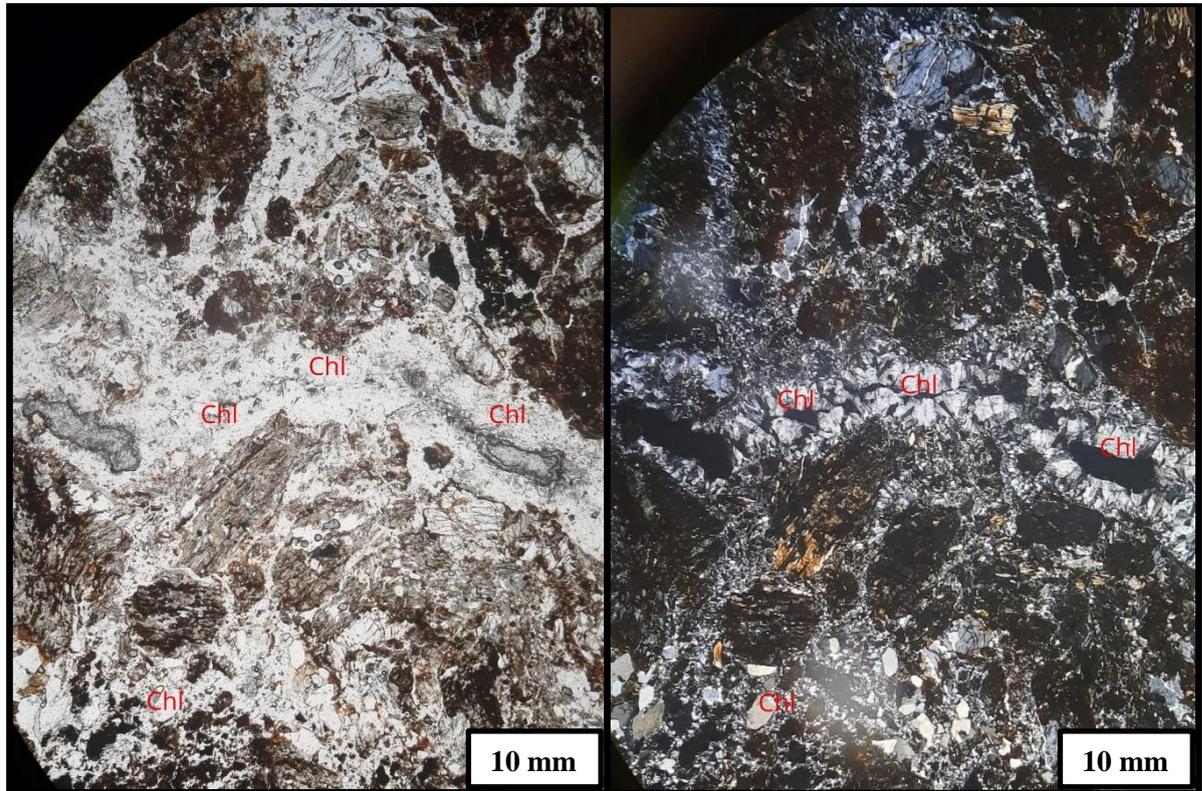


Fonte: Autor da obra.

#### 4.1.5 Clorita

Os minerais de Mg-clorita no centro da imagem à luz plano polarizada ocorrem na forma de veio, este, proveniente de depósitos hidrotermais, à luz plano polarizada é incolor, possui relevo baixo. Com polarizadores cruzados, possuem cor de interferência branco de primeira ordem, apresentam um hábito de escamas fibrosas no veio, essas escamas possuem extinção paralela ao giro de  $90^\circ$  da platina. A birrefringência é baixa, de aproximadamente (0,002 a 0,010), Figura 10.

**Figura 10** - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, minerais de Mg-clorita em veio à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-26

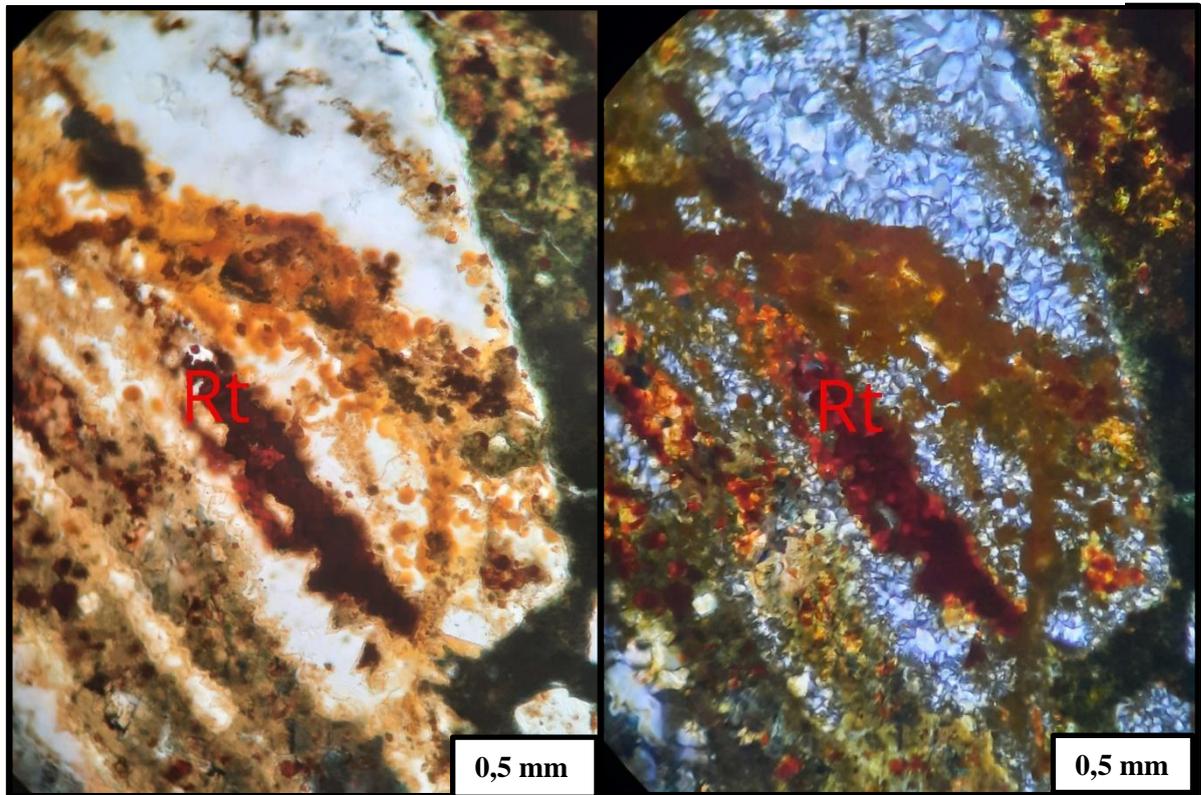


**Fonte:** Autor da obra.

#### 4.1.6 Rutilo

O mineral rutilo, no centro das imagem à luz plano polarizada, é castanho avermelhado, granular anédrico, apresenta relevo alto, com algumas fraturas. A polarizadores cruzados possui cor de interferência branco de ordem superior, que é mascarada pela cor de absorção castanha escura. A birrefringência é alta, de aproximadamente (0,28), Figura 11.

**Figura 11** - Fotomicrografia com objetiva de aumento 20x, mineral de rutilo à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-07

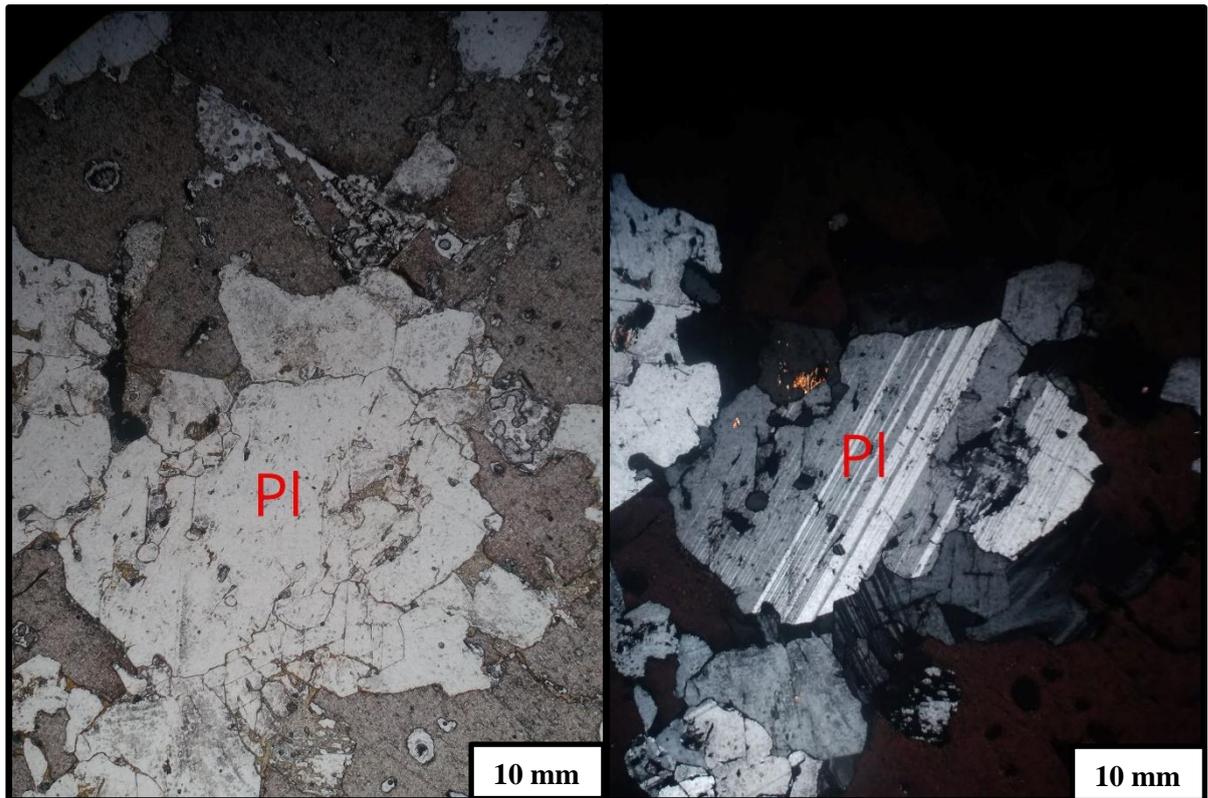


Fonte: Autor da obra.

#### 4.1.7 Plagioclásio

Os minerais plagioclásio no centro das imagens à luz plano polarizada são incolores, os grãos são anédricos e possuem relevo baixo. Com os polarizadores cruzados, possuem a macla polissintética da albita, os grãos possuem extinção com ângulo  $18^\circ$ , e o tamanho dos grãos varia de 0,5 a 10 mm. A birrefringência é baixa, com valores entre (0,008 a 0,010), Figura 12.

**Figura 12** - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, minerais de plagioclásio à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-27.

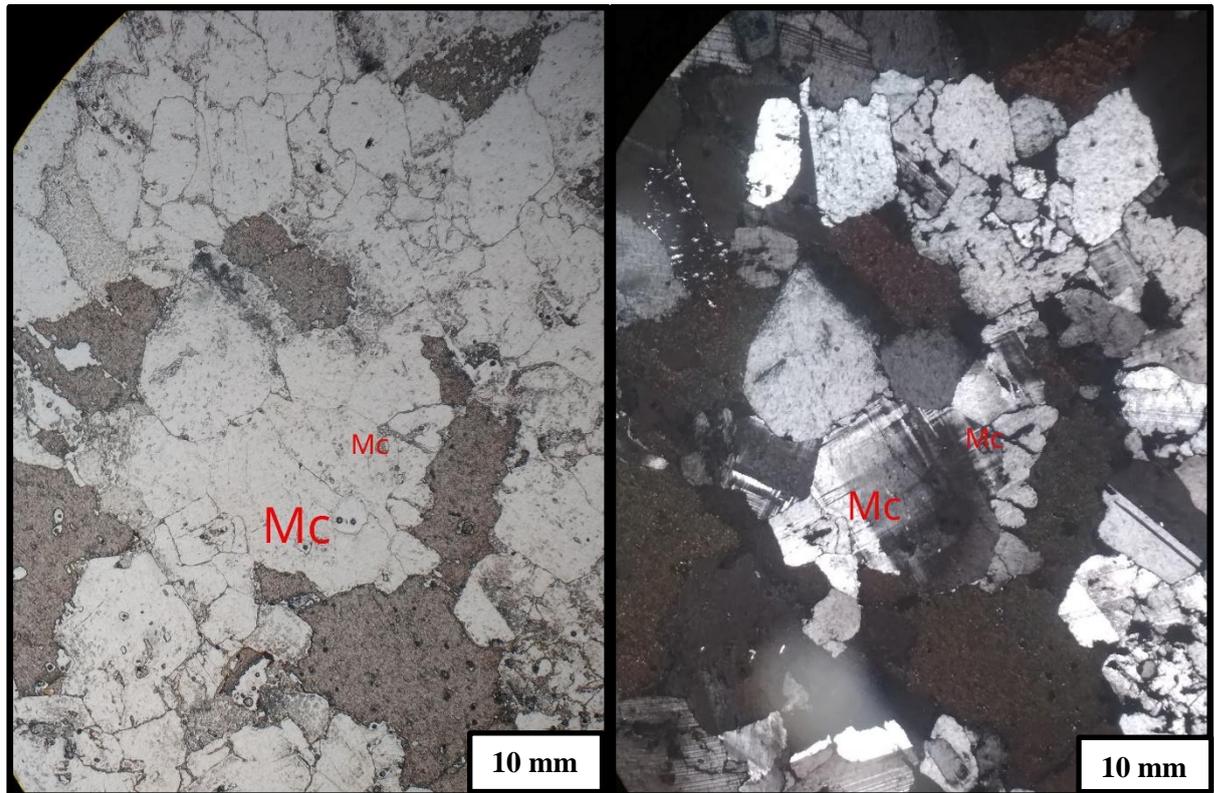


Fonte: Autor da obra.

#### 4.1.8 Microclina

Os minerais microclina, no centro da imagem à luz plano polarizada, são incolores, apresentam relevo baixo, com algumas fraturas. Com os polarizadores cruzados, possuem cor de interferência branco primeira ordem, os grãos são anédricos, e o tamanho dos grão varia de 0,5 a 10 mm, possuem a macla tartan. A birrefringência é baixa, com valores entre (0,006 a 0,009), Figura 13.

**Figura 13** - Fotomicrografia com objetiva de aumento 2x, mineral de microclina à luz plano polarizada (PPL) e polarizadores cruzados (XPL), respectivamente. Lâmina LSC-27



Fonte: Autor da Obra.

## 4.2 Análises químicas por MEV-EDS

Por meio das análises químicas de MEV-EDS, foi possível caracterizar geoquimicamente, mesmo que de forma semiquantitativa, as fases minerais que constituem as rochas. Portanto, contribuindo de maneira satisfatória com a composição real dos minerais estudados, bem como a variação de seus respectivos elementos constituintes. As análises foram feitas nas lâminas delgadas polidas de identificação LSC-07, LSC-14, LSC-22, LSC-26, LSC-27 e LSC-67. Foi separado um campo de análise em cada uma das respectivas lâminas e desenvolvida a análise. Também foram fixados cristais em fita condutora de carbono e estes metalizados com carbono para análise que foi desenvolvida.

### 4.2.1 Lâmina LSC-07

Foram realizadas oito análises por EDS no campo selecionado da lâmina, Figura 14. Dentre essas análises, destaque para o espectro 2, que corresponde ao mineral vivianita, um

fosfato de ferro hidratado, cor azul a azul esverdeado, fórmula química  $(\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$ . O espectro apresenta na sua composição teores altos dos elementos químicos Fe e P, baixo teor de Si e um teor muito baixo de ítrio (Y), um ETR que pode ser explicado como resíduo dessa interação de formação de rochas alcalinas carbonatíticas, exemplo carbonatos de ETR ou metassomatismo, Figura 15.

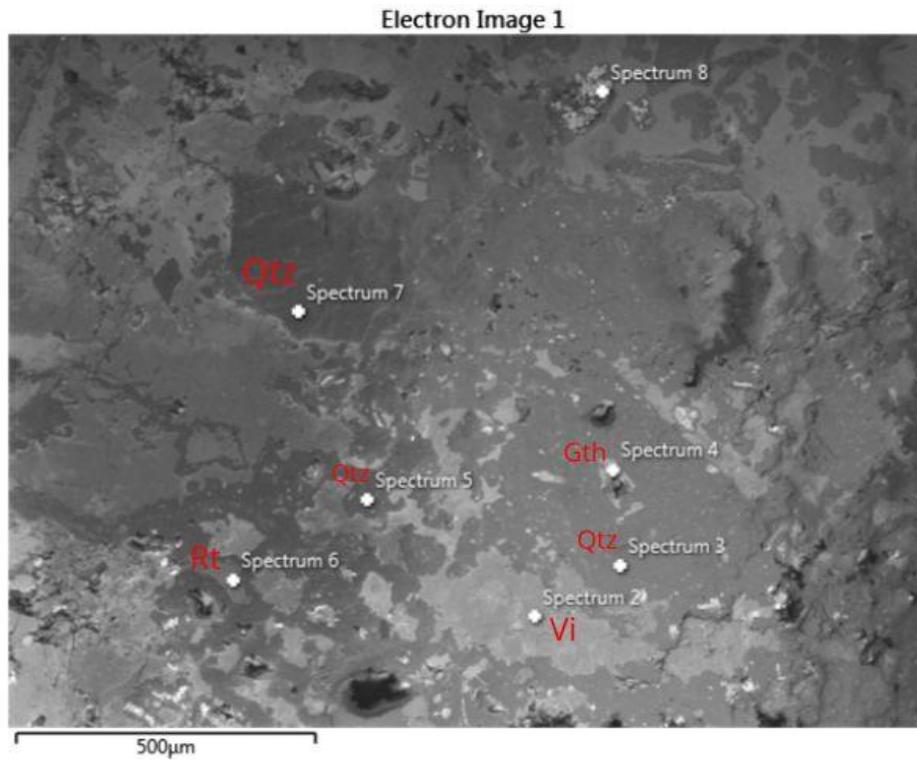
No espectro 4, foi identificado o mineral goethita, um óxido de ferro de cor preta amarronzada, fórmula química  $(\text{FeO}(\text{OH}))$ , ocorrência explicada por processo de enriquecimento supergênico e hidrotermalismo. O espectro apresenta na sua composição um teor alto de Fe, teor médio de Al, teores baixos de Si e P, e um teor muito baixo de K.

No espectro 6, foi identificado mineral rutilo Tabela 1, o que corrobora com a descrição feita em lâmina. O espectro, apresenta na sua composição um teor muito alto de Ti, baixo teor de Nb, nióbio encontrado no mineral pirocloro associado a ETR, teor baixo de Si e muito baixo de Fe.

Nos espectros 3, 5 e 7 foram identificados o mineral quartzo, o que corrobora com a descrição feita em lâmina. Nos espectros, suas composições apresentam teor muito alto de Si e um baixo teor de Fe, Tabela 1.

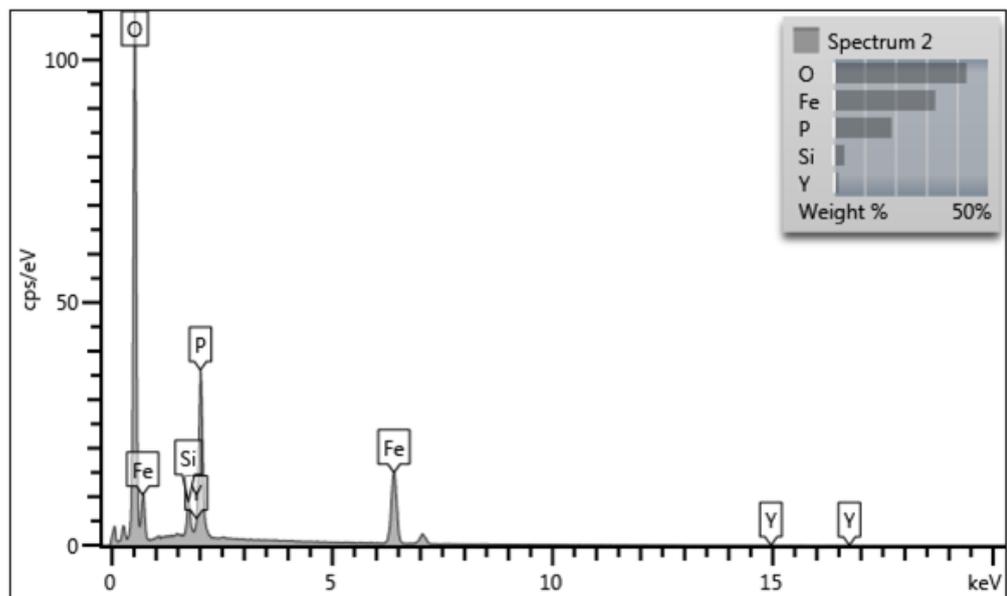
A Tabela 1 representa a composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e a identificação dos minerais.

**Figura 14** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-07.



Fonte: MEV-EDS.

**Figura 15** - Espectro 2 com a composição química referente ao mineral vivianita, LSC-07.



Fonte: MEV-EDS.

**Tabela 1** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação dos minerais, LSC-07.

Spectrum Label	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4	Spectrum 5	Spectrum 6	Spectrum 7
O						
Al			16,96			
Si	7,61	99,7	5,01	99,46	1,15	99,62
P	43,27		2,41			
K			0,3			
Ti					96,04	
Fe	47,15	0,3	75,32	0,54	0,44	0,38
Y	1,97					
Nb					2,38	
La						
Ce						
ND						
Total	100	100	100	100	100	100
	vivianita	quartzo	goethita	quartzo	rutilo	quartzo

**Fonte:** Autor da obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-EDS.

#### 4.2.2 Lâmina LSC-14

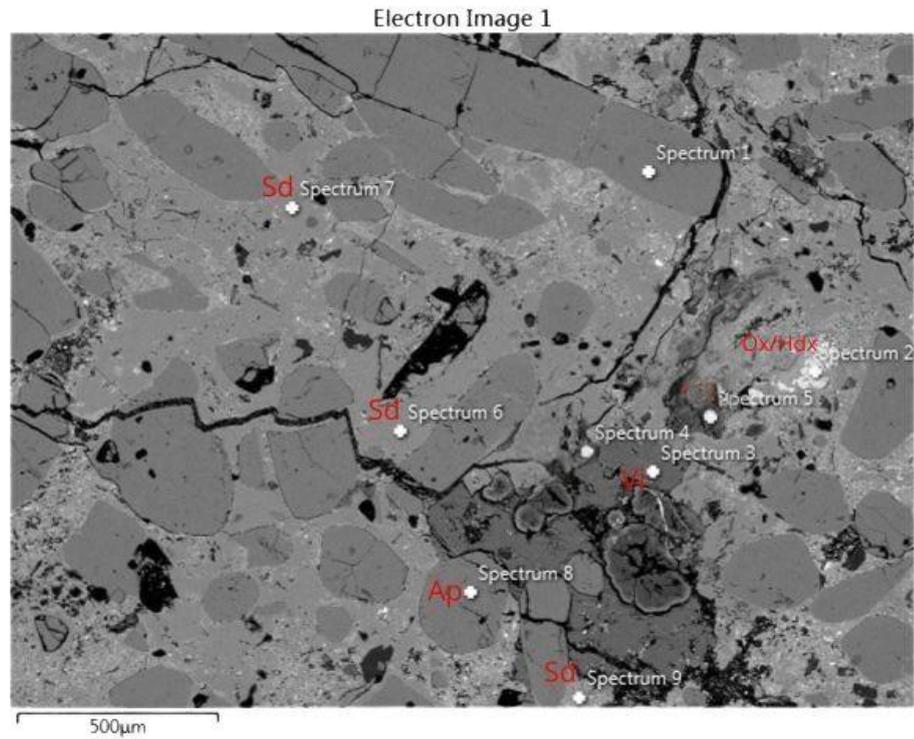
Foram realizadas nove análises por EDS no campo selecionado da lâmina, Figura 16. Dentre essas análises, destaque para os espectros 6, 7 e 9, correspondem ao mineral siderita, um carbonato de ferro do grupo da calcita, cor marrom escuro, fórmula química  $(\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3)$ , hábito tipo romboédrico. Entretanto, na amostra como, mostra a imagem, encontra-se em agregados finamente granulados e maciços. Sua ocorrência é explicada por produto do hidrotermalismo, fluido magmático ou mesmo metamorfismo de contato ocasionado pela intrusão dômica ígnea. Nos espectros, suas composições apresentam altos teores de Fe e baixos teores de Ca e P. As Figuras 17, 18 e 19, representam os espectros citados acima.

No espectro 8 foi identificado mineral apatita, um fosfato, grupo da apatita, fórmula química  $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH}))$ , o que corrobora com a descrição em lâmina. No espectro, sua composição apresenta altos teores de Ca e P, e baixo teor de itérbio (Yb), um ETR.

No espectro 2 foi identificado óxido/hidróxido de ferro, sua composição apresenta alto teor de Fe, baixos teores de Mg e Ti, e muito baixos teores de Mn e V. A ocorrência desses óxidos/hidróxido de ferro é explicada por hidrotermalismo e ocorre em zonas de enriquecimento supergênico.

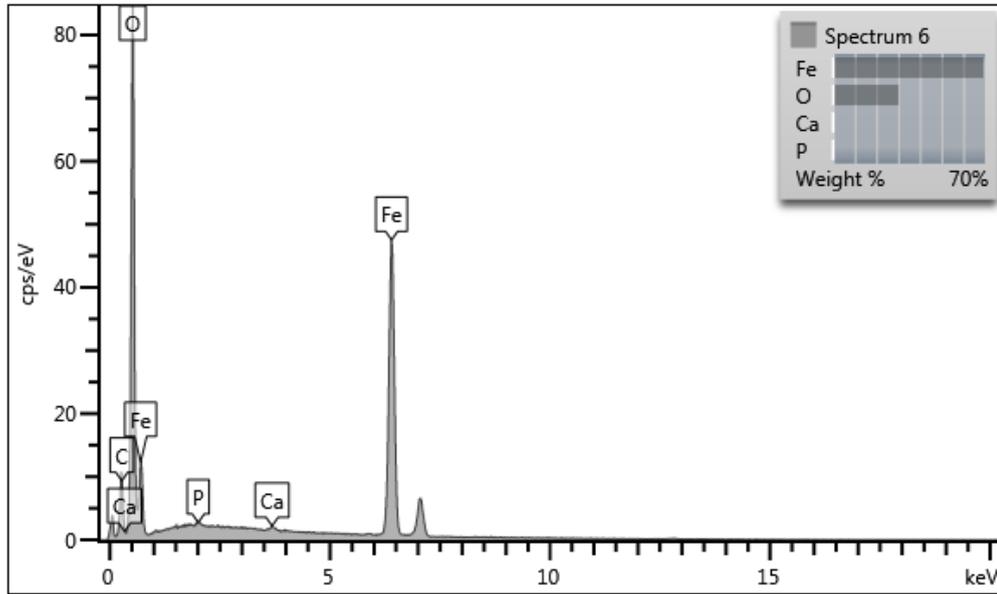
A Tabela 2 representa a composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e a identificação dos minerais.

**Figura 16** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-14



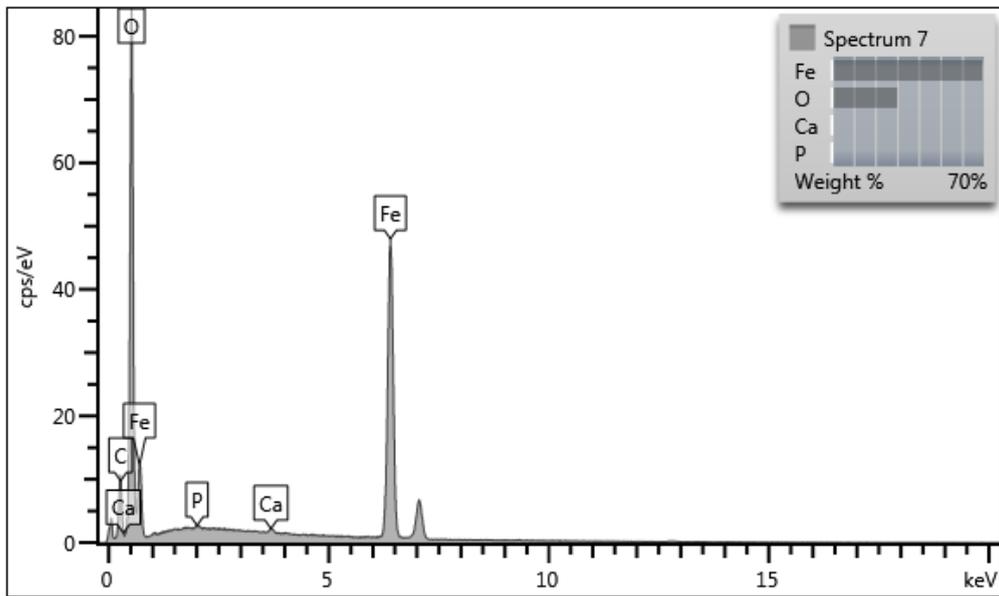
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 17** - Espectro 6 com a composição química referente ao mineral siderita, LSC-14

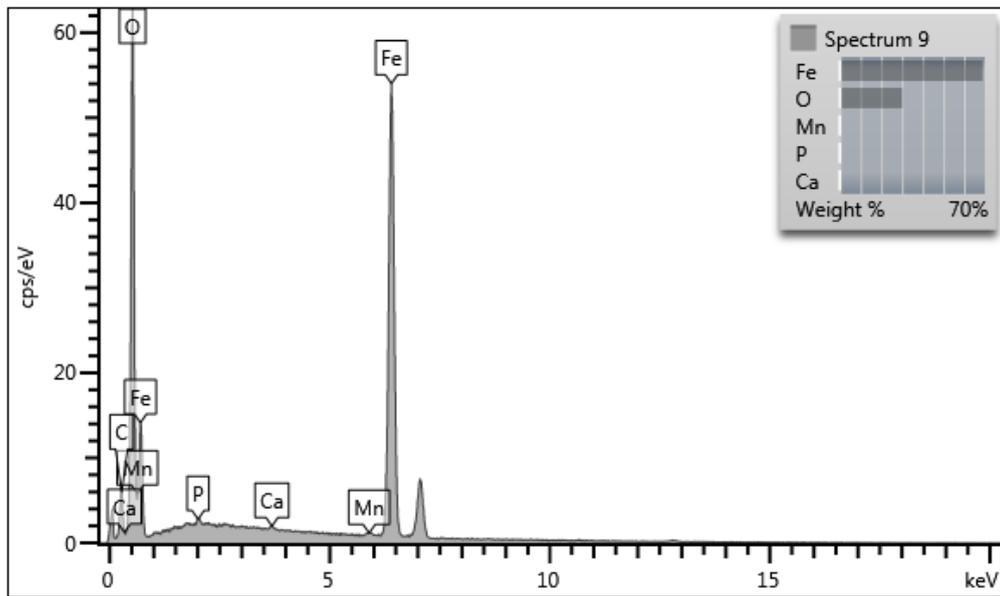


Fonte: MEV-EDS.

**Figura 18** - Espectro 7 com a composição química referente ao mineral siderita, LSC-14



Fonte: MEV-EDS.

**Figura 19** - Espectro 9 com a composição química referente ao mineral siderita, LSC-14

Fonte: MEV-EDS.

**Tabela 2** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação dos minerais, LSC-14

Spectrum Label	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 6	Spectrum 7	Spectrum 8	Spectrum 9
O						
Mg	2,41					
Al						
Si						
P		37,43	0,67	0,44	41,91	0,71
Cl						
Ca			0,41	0,49	56,47	0,24
Ti	1					
V	0,37					
Mn	0,59					0,54
Fe	95,62	61,25	98,92	99,07		98,5
Sr						
Y		1,32				
Nb						
Yb					1,62	
<b>Total</b>	100	100	100	100	100	100
	óxido/hidróxido de ferro	vivianita	siderita	siderita	apatita	siderita

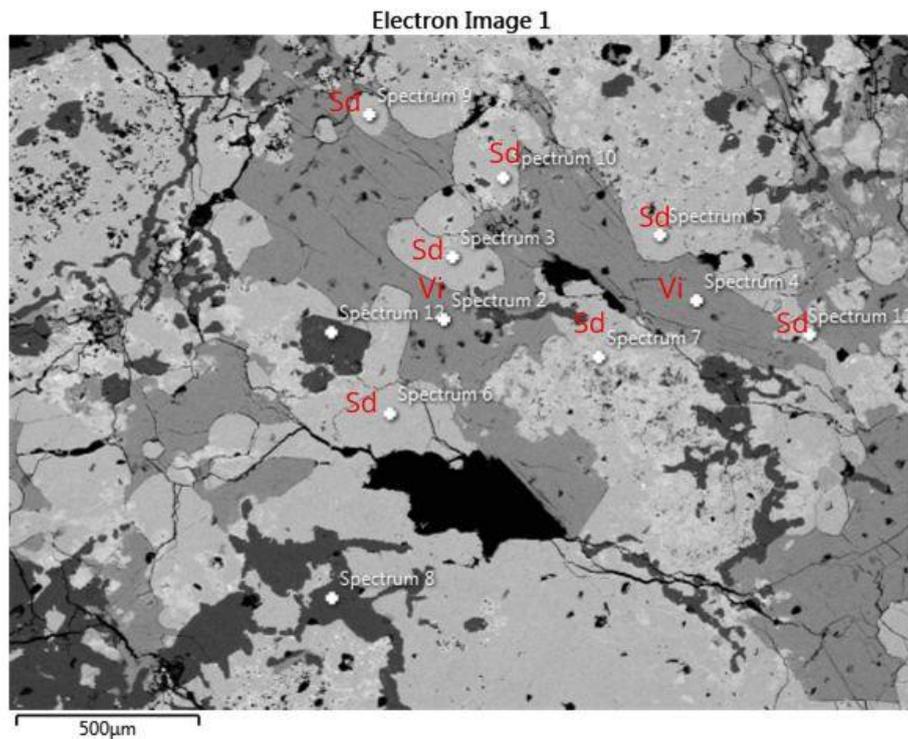
Fonte: Autor da obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-EDS.

### 4.2.3 Lâmina LSC-22

Foram realizadas doze análises por EDS no campo selecionado da lâmina, Figura 20. Dentre essas análises, destaque para os espectros 2 e 4, que correspondem ao mineral vivianita, os espectros 3, 5, 6, 7, 9, 10 e 11 correspondem ao mineral siderita, ambos minerais já citados na caracterização das lâminas LSC-07 e LSC-14.

A Tabela 3 representa a composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e a identificação dos minerais.

**Figura 20** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-22.



Fonte: MEV-EDS.

**Tabela 3** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação dos minerais, LSC-22.

Spectrum Label	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4	Spectrum 5	Spectrum 6	Spectrum 7	Spectrum 9	Spectrum 10	Spectrum 11
O									
Si									
P	37,73		37,45	0,83	0,59	0,94	0,48	0,59	1,53
Ca		0,39		0,69	0,39	0,53	0,95	0,54	0,74
Mn				0,62	0,62		0,92	0,78	
Fe	61,09	99,12	61,21	97,86	98,39	98,53	97,65	98,09	97,73
Zn		0,5							
Y	1,18		1,35						
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>							
	vivianita	siderita	vivianita	siderita	siderita	siderita	siderita	siderita	siderita

**Fonte:** Autor da obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-EDS.

#### 4.2.4 Lâmina LSC-26

Foram realizadas sete análises por EDS no campo selecionado da lâmina, Figura 21. Dentre essas análises, destaque para os espectros 2 e 3.

O espectro 2 corresponde à ilmenita, um mineral composto por óxido de titânio e ferro, cor vermelho acastanhado a preto, hábito granular maciço. Sua composição no espectro apresenta um alto teor de Ti, médios teores de Fe e N, baixos teores de Mg e Mn, e muito baixos teores de Nb e V, Figura 22.

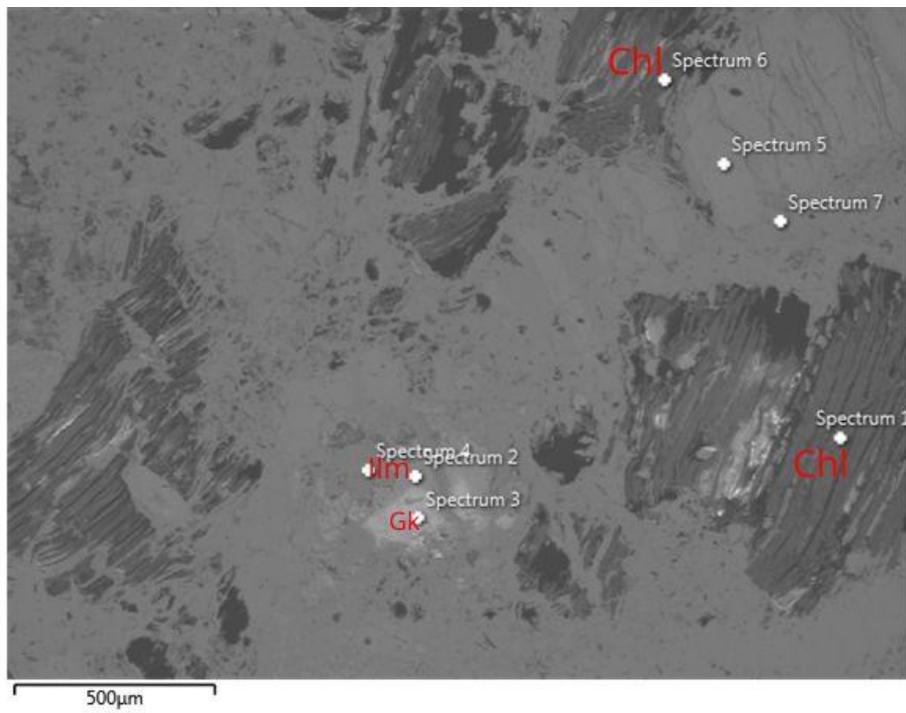
O espectro 3 corresponde à geikielita, um mineral composto de óxido de titânio e magnésio, cor vermelha a marrom avermelhada, hábito granular maciço. Sua composição no espectro apresenta um alto teor de Ti, médios teores de Fe, N e Mg, baixo teor de Mn e muito baixos teores de Nb e W, Figura 23.

Para realizar a classificação de ambos os minerais, foi feito o cálculo da massa molar dos óxidos, logo, obteve-se as fórmulas químicas com as composições de ambos os minerais:  $(Mg_{0.48} Fe_{0.52})_{\Sigma_i} TiO_3$  espectro 2 ilmenita e  $(Mg_{0.58} Fe_{0.42})_{\Sigma_i} TiO_3$  espectro 3 geikielita. Ambos óxidos são cristalizados da diferenciação magmática alcalina carbonatítica.

Os espectros 1 e 6 correspondem ao mineral clorita, fórmula química  $(Mg,Al,Fe)_{12}[(Si,Al)_8O_{20}](OH)_{16}$ . Sua composição nos espectros apresentam alto teores de Si e Mg, médio teor de Al, baixos teores de Na, Fe, Mn e Ca, e muito baixos teores de P e Ti, classificação do mineral que corrobora com a descrição feita em lâmina.

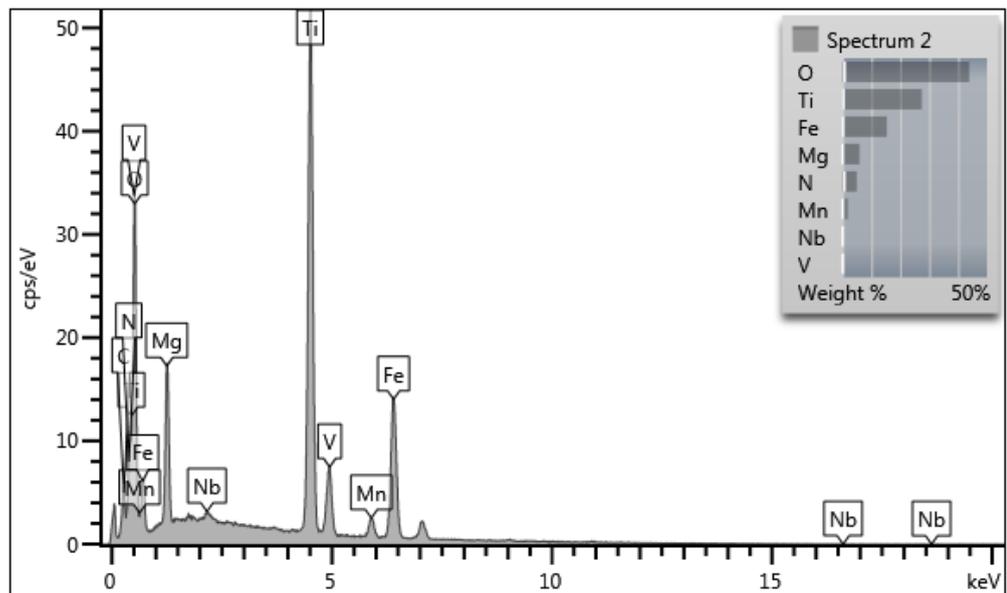
A Tabela 4 representa a composição química das massas de óxidos dos elementos identificação de minerais.

**Figura 21** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-26

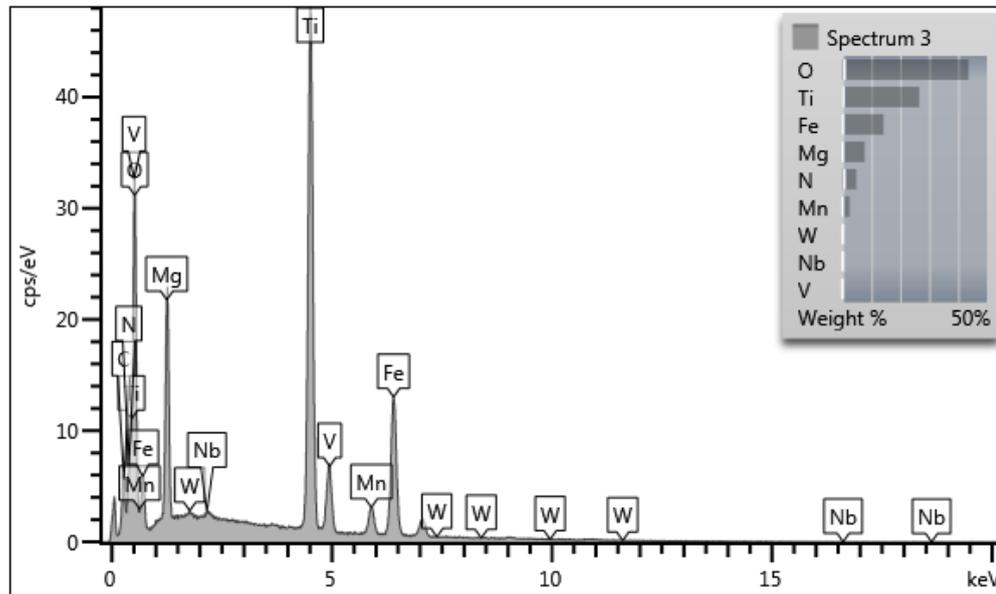


Fonte: MEV-EDS.

**Figura 22** - Espectro 2 com a composição química referente ao mineral ilmenita, LSC-26.



Fonte: MEV-EDS.

**Figura 23** - Espectro 3 com a composição química referente ao mineral geikielita, LSC-26.

Fonte: MEV-EDS.

**Tabela 4** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação de minerais, LSC-26

Spectrum Label	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 6
N		19,08	18,55	
O				
F				
Na	4,39			3,46
Mg	24,81	9,8	12,83	29,03
Al	17,02			18,09
Si	45,19			42,5
P	0,5			0,51
K	0,38			0,54
Ca	1,54			0,73
Ti	0,5	45,83	44,29	0,59
V		0,37	0	
Mn	1,97	2,38	3,17	1,18
Fe	3,7	21,93	20,34	3,13
Ni				0,25
Y				
Nb		0,61	0,44	
W			0,39	
Total	100	100	100	100
	clorita	ilmenita	geikielita	clorita

Fonte: Autor da obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-EDS.

#### 4.2.5 Lâmina LSC-27

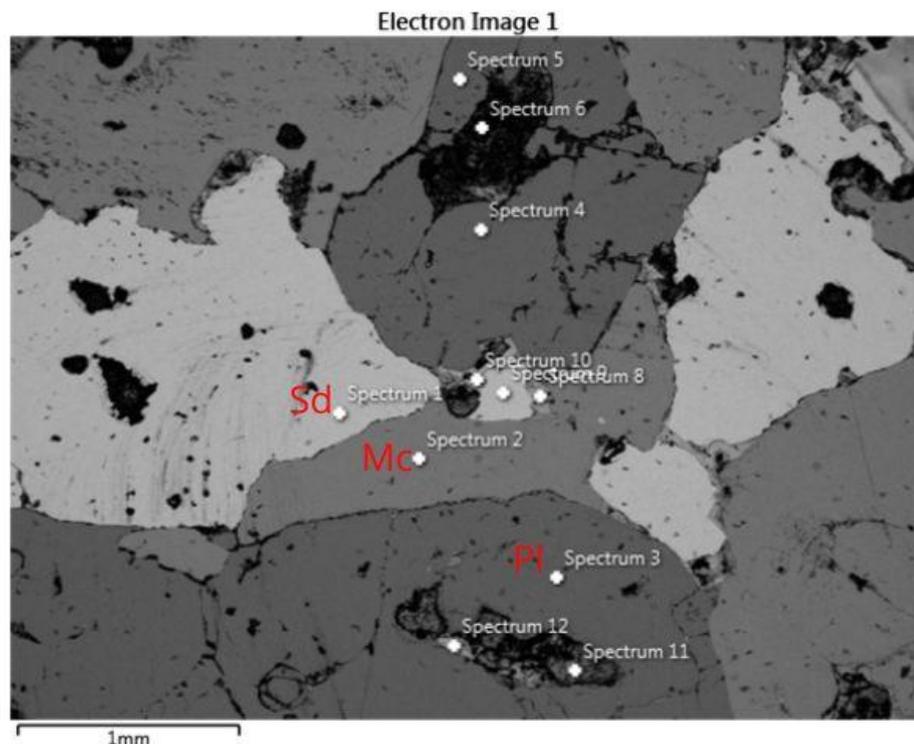
Foram realizadas doze análises por EDS no campo selecionado da lâmina, Figura 24. Dentre essas análises, destaque para os espectros 2 e 3.

O espectro 2 corresponde ao mineral microclina, fórmula química  $KAlSi_3O_8$ . Sua composição no espectro apresenta um alto teor de Si, médios teores de Al e K, baixo teor do metal índio (In) e muito baixo teor de Na, como indicado na Tabela 5. A classificação desse mineral corrobora a descrição microscópica feita em lâmina.

O espectro 3 corresponde ao mineral plagioclásio (albita), fórmula química  $(Na,Ca)Al(Si,Al)Si_2O_8$ . Sua composição no espectro apresenta um alto teor de Si, médios teores de Al e Na e muito baixo teor do metal índio (In), como indicado na Tabela 5. A classificação desse mineral corrobora a descrição microscópica feita em lâmina. O espectro 1 corresponde ao mineral siderita, já citado na identificação das lâminas LSC-07 e LSC-14.

A Tabela 5 representa a composição química das massas de óxidos dos elementos e a identificação de minerais.

**Figura 24** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-27.



Fonte: MEV-EDS.

**Tabela 5** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação de minerais, LSC-27.

Spectrum Label	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
O			
Na		0,43	11,43
Mg			
Al		18,36	19,54
Si		64,54	68,51
Cl			
K		15,64	
Ca			
Mn	3,25		
Fe	96,75		
In		1,02	0,52
Ta			
Ir			
Total	100	100	100
	siderita	microclina	plagioclásio

**Fonte:** Autor da obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-EDS.

#### 4.2.6 Lâmina LSC-67

Foram realizadas vinte e duas análises por EDS no campo selecionado da lâmina, Figura 25 e Figura 26. Dentre essas análises, destaque para os espectros 4 e 18, que são carbonatos pertencentes ao grupo da dolomita. Para fazer a classificação, foi realizado o cálculo da massa molar dos óxidos, logo, obteve-se as fórmulas químicas com as composições de ambos os espectros:  $(Ca)_{\Sigma_1}(Mg_{0.59} Fe_{0.25} Ca_{0.15} Sr_{0.01})_{\Sigma_1}$  espectro 4 e  $(Ca)_{\Sigma_1}(Mg_{0.95} Fe_{0.02} Mn_{0.02} Ca_{0.01})_{\Sigma_1}$  espectro 18. Em ambos os espectros temos em suas composições altos teores de Ca e Mg e baixos teores de Fe, Mn e Sr. A Figura 28 representa o espectro 4, e a Figura 31, o espectro 18.

O espectro 3 corresponde ao mineral estroncianita, um raro carbonato de estrôncio do grupo da aragonita, fórmula química  $SrCO_3$ . Sua composição no espectro apresenta um alto teor de Sr e baixo teor de Ca e Ba, Figura 27.

O espectro 5 corresponde a um sulfeto de ferro. Sua composição no espectro apresenta um alto teor de S, médio teor de Fe e baixos teores de As e Hg, Figura 29.

O espectro 10 corresponde a um fosfato de cério. Sua composição no espectro apresenta altos teores de P, ETR cério (Ce) e lantânio (La), baixos teores de Ca, ETR neodímio (Nd) e Praseodímio (Pr), e muito baixos teores de Ba, Fe e S, Figura 30.

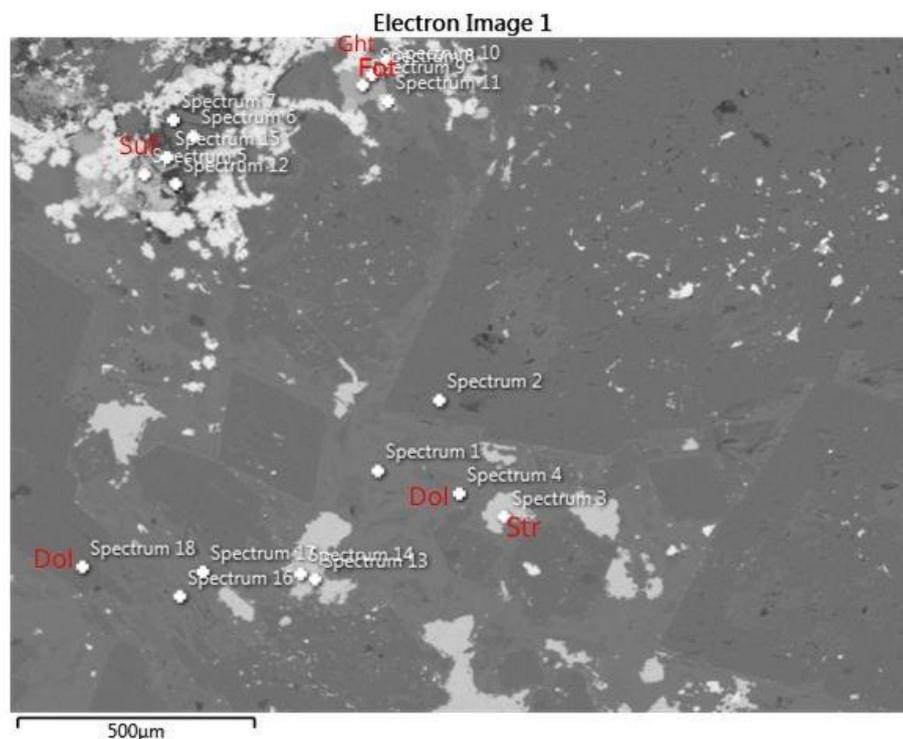
O espectro 21 corresponde ao mineral rabdofana-(Ce), um fosfato. Sua composição no espectro apresenta altos teores de ETR cério (Ce) e lantânio (La) e P, médio teor ETR neodímio (Nd), baixos teores de Ca, Th e ETR Praseodímio (Pr), e muito baixos teores de Ba, Fe, S e ETR ítrio (Y), Figura 32.

Os carbonatos foram identificados em descrição microscópica nas lâminas, porém foi feita uma classificação utilizando o termo geral, nomeando somente como carbonatos, mas com o MEV-EDS foi possível classificá-los corretamente quanto ao grupo pertencente.

A Tabela 6 representa a composição química das massas de óxidos dos elementos e a identificação de minerais.

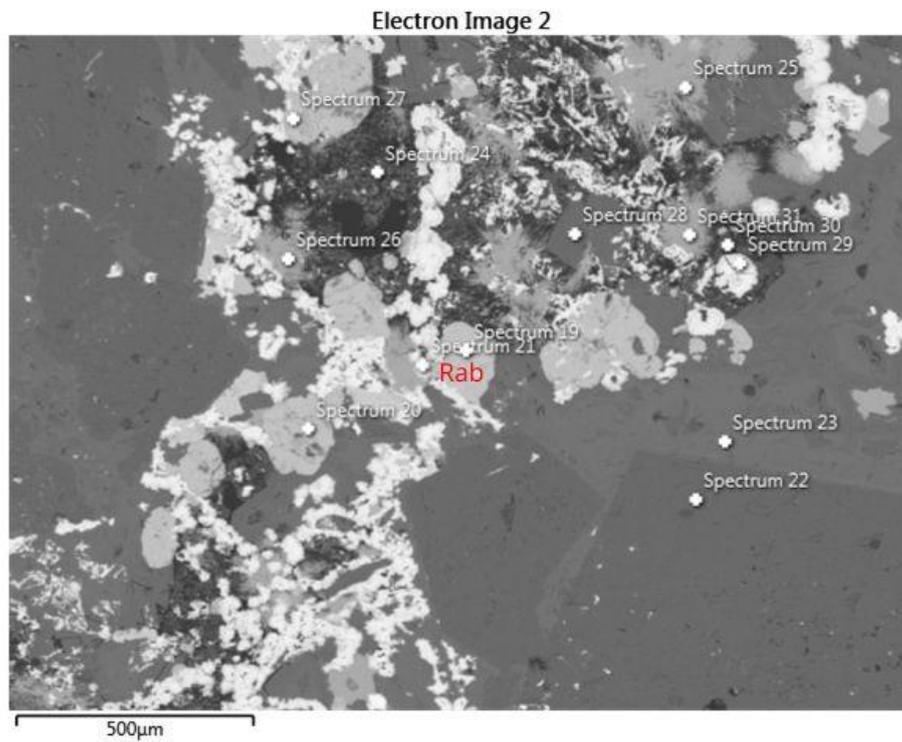
Foram produzidos dois diagramas ternários para classificação desses carbonatos, classificados nos espectros 4 e 18, representados, respectivamente, pela Figura 33 e Figura 34.

**Figura 25** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-67 imagem 1. sulfeto de ferro sigla (Sul) e fosfato de cério sigla (Fot).



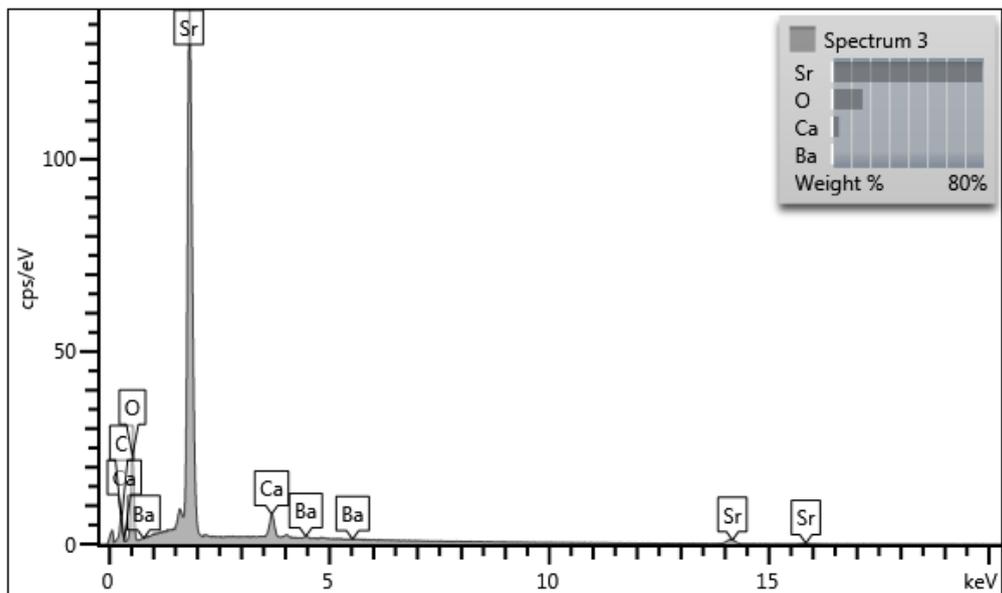
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 26** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina, LSC-67 imagem 2. rabdofana-(Ce) sigla (Rab).



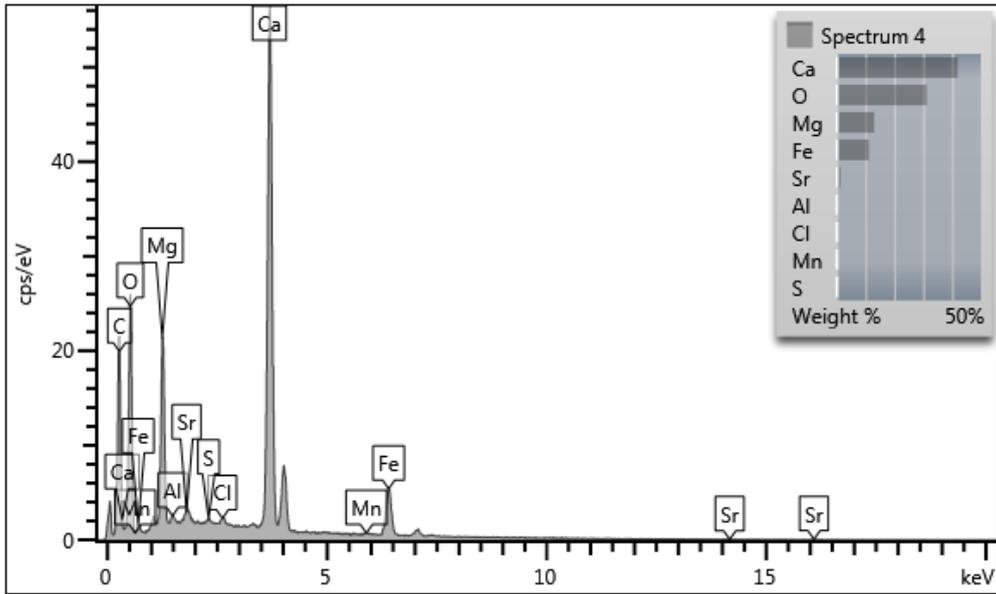
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 27** - Espectro 3 com a composição química referente ao mineral estroncianita, LSC-67



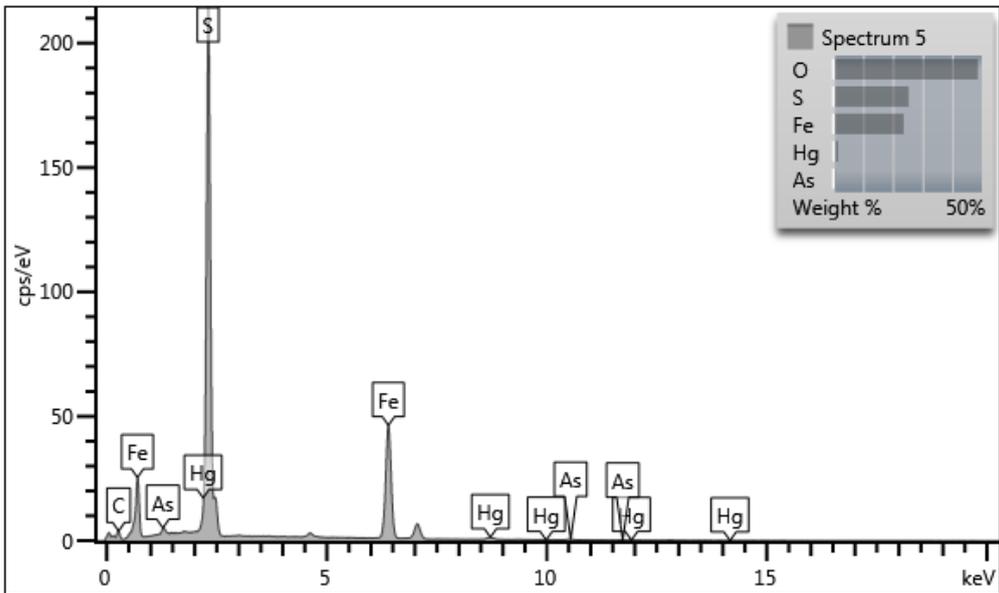
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 28** - Espectro 4 com a composição química referente ao mineral dolomita, LSC-67



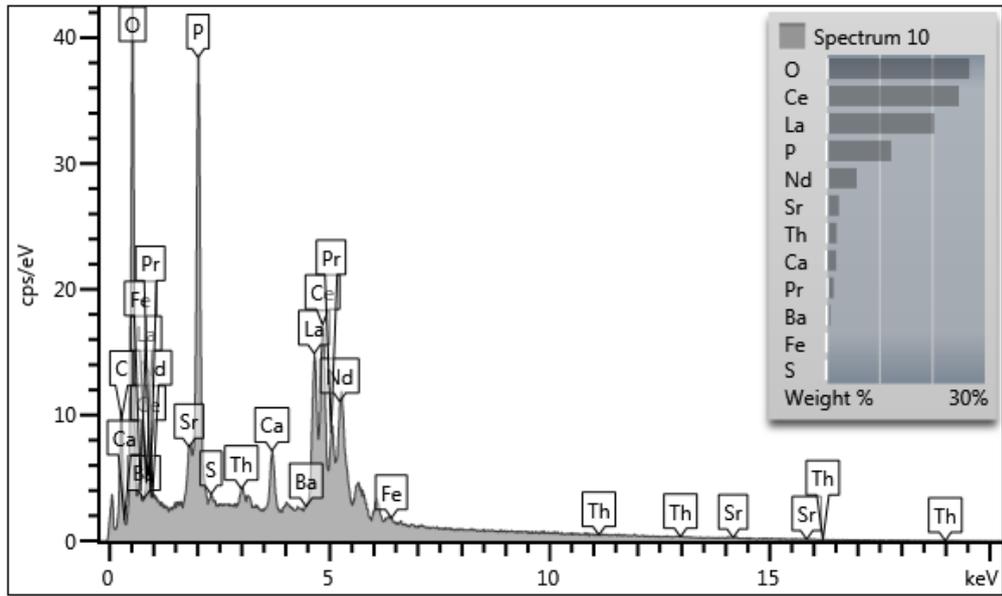
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 29** - Espectro 5 com a composição química referente ao sulfeto de ferro, LSC-67



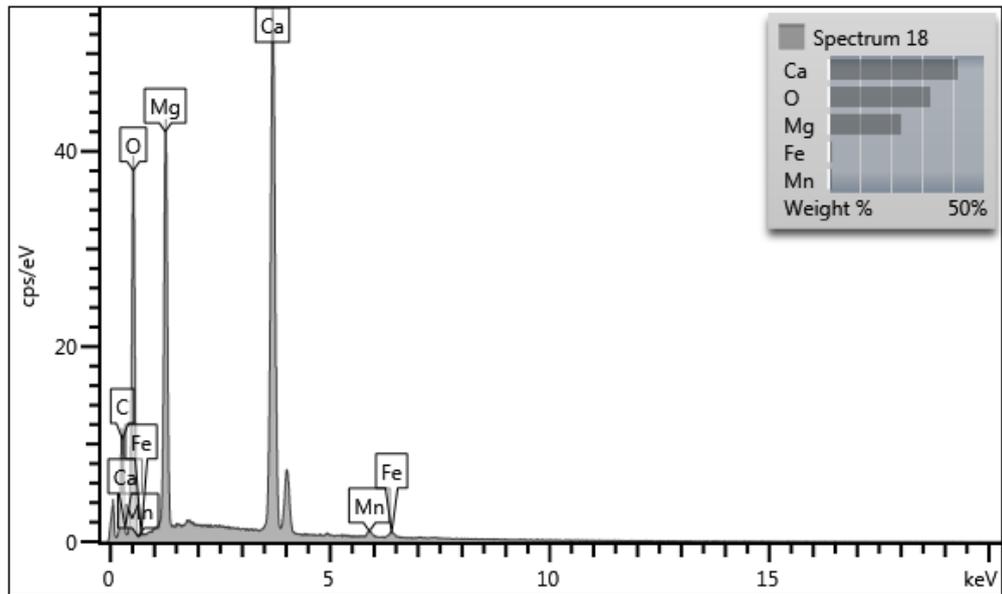
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 30** - Espectro 10 com a composição química referente ao fosfato de cério, LSC-67



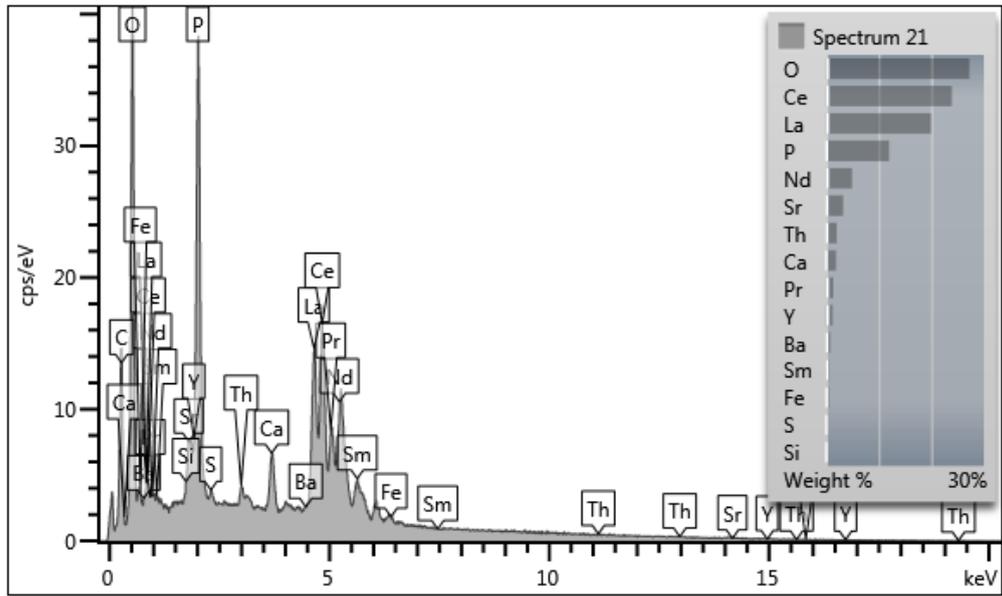
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 31** - Espectro 18 com a composição química referente ao mineral dolomita, LSC-67.



Fonte: MEV-EDS.

**Figura 32** - Espectro 21 com a composição química referente ao mineral rabdofana-Ce, LSC-67.



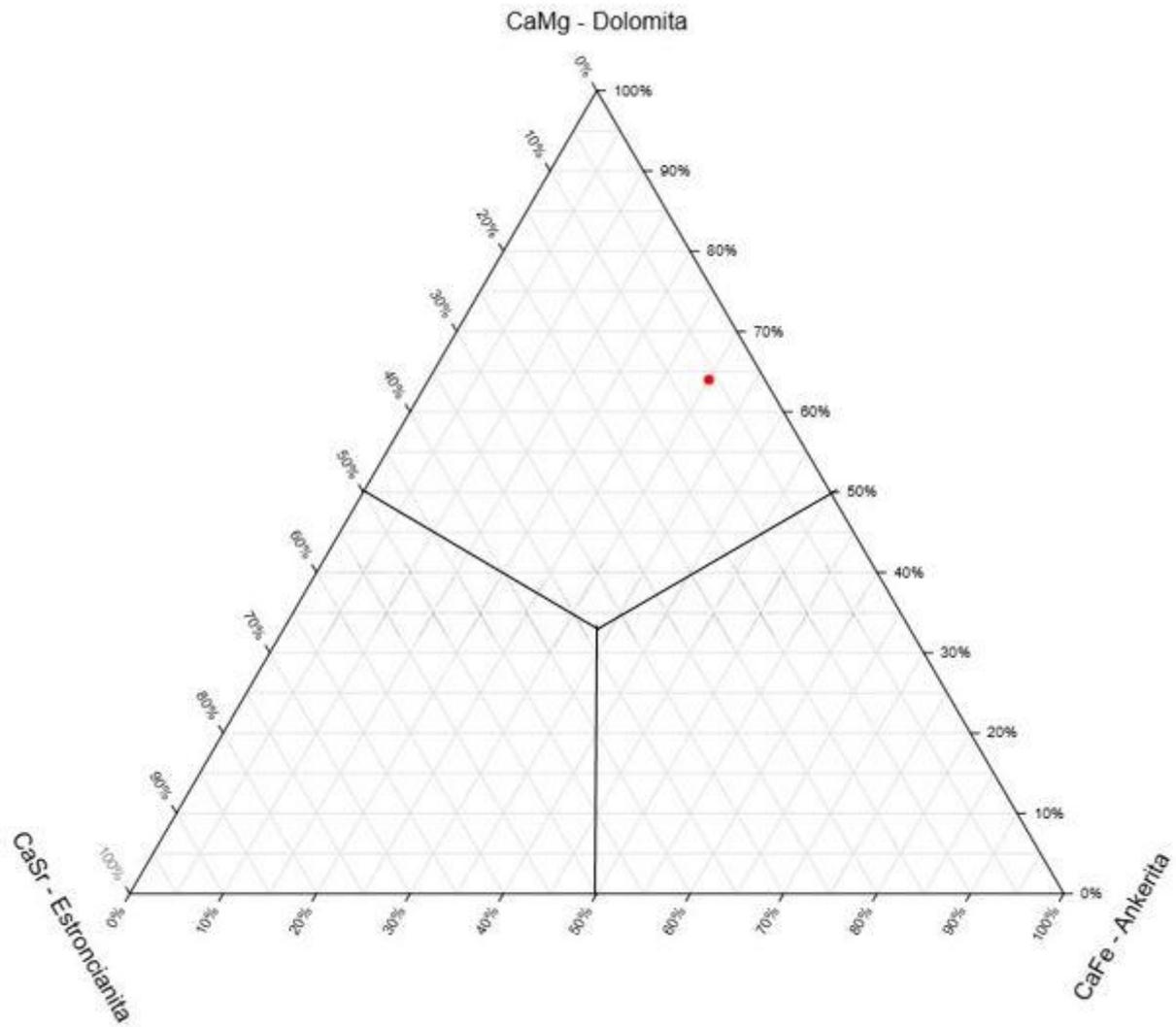
Fonte: MEV-EDS.

**Tabela 6** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação de minerais, LSC-67.

Spectrum Label	Spectrum 3	Spectrum 4	Spectrum 5	Spectrum 10	Spectrum 18	Spectrum 21
O						
Na						
Mg		21,58			38,72	
Al		1,03				
Si						0,63
P				28,23		27,44
S		0,55	63,33	0,69		0,9
Cl		0				
K						
Ca	5,24	58,58		2,71	58,15	2,56
V						
Mn		0,33			1,45	0,72
Fe		16,05	33,81	0,44	1,67	
As			1,09			
Sr	93,62	1,51		2,91		3,79
Ag						1,48
Ba	1,13			0,91		
La				24		0,86
Ce				29,38		23,39
Pr				1,68		27,99
Nd				6,77		1,55
Sm						5,72
Yb						0,75
W						
Hg			1,77			
Th				2,28		2,22
Total	100	99,63	100	100	100	100
	estroncianita	dolomita	sulfeto de ferro	fosfato de Cério	dolomita	rabdofana -Ce

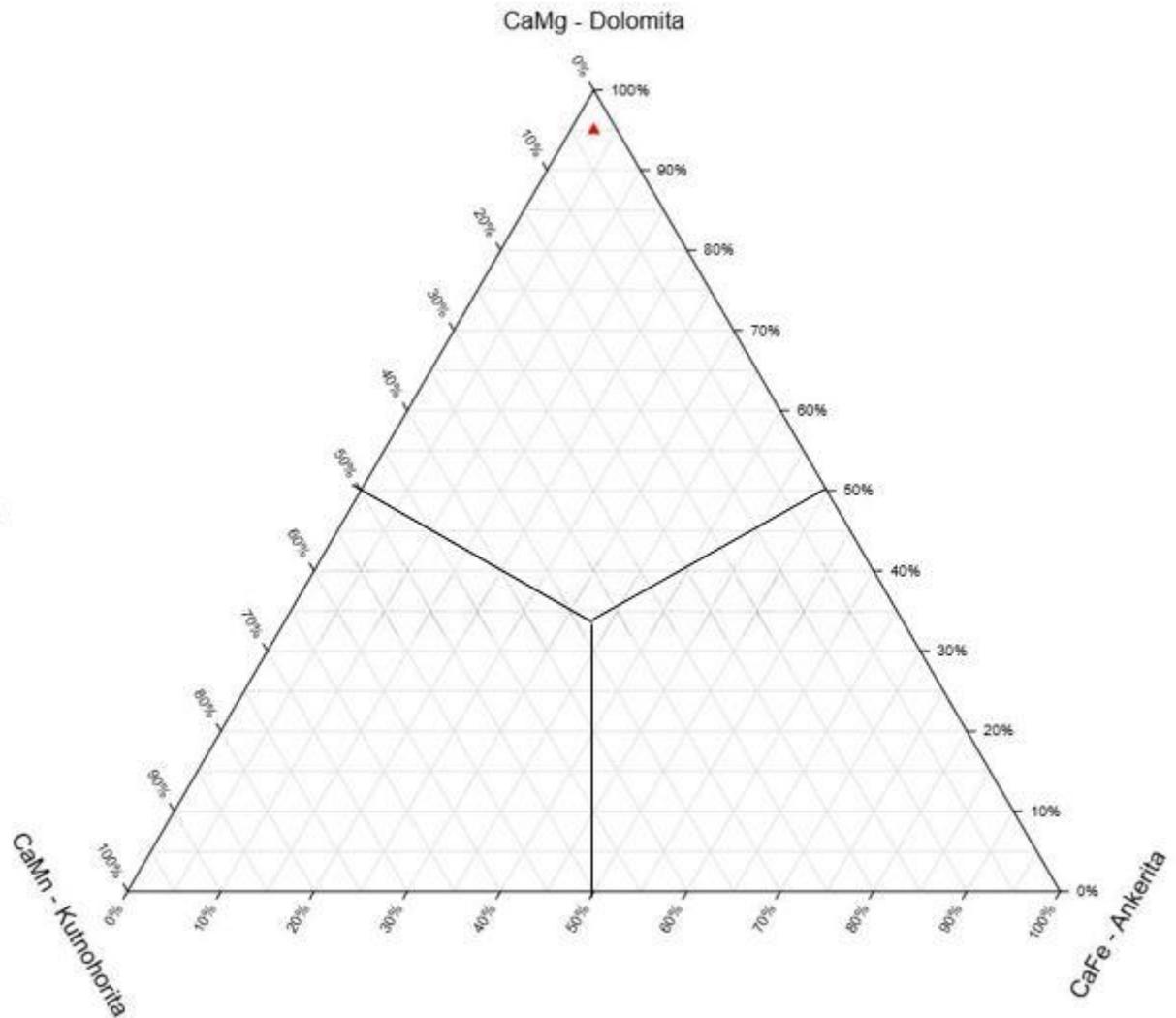
**Fonte:** Autor da obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-EDS.

**Figura 33** - Diagrama ternário (CaMg-CaSr-CaFe) espectro 4, carbonato classificado dentro do grupo da dolomita.



**Fonte:** Autor da obra.

**Figura 34** - Diagrama ternário (CaMg-CaMn-CaFe) espectro 18, carbonato classificado dentro do grupo da dolomita.



**Fonte:** Autor da obra.

#### 4.2.7 Outros Minerais

Algumas amostras estudadas apresentavam elevada porosidade, devido à presença de cavidades parcialmente preenchidas por cristais euédricos. Devido à impossibilidade na confecção de lâminas delgadas, optou-se por fragmentar as amostras e selecionar os cristais para análises no MEV.

#### 4.2.8 Switzerita

Os espectros 4 e 5 correspondem ao mineral switzerita, um fosfato hidratado de Mn. Por ser um mineral instável, frequentemente encontra-se alterado para metaswitzerita, fazendo com que a switzerita seja um mineral relativamente raro. Apresenta hábito prismático ou lâminas, cor rosa claro, em cristais de até 5 cm Figura 35. Imagem em BSE no MVE, Figura 36.

O espectro 4 tem na sua composição altos teores de Mn e P, e baixos teores de Ca, ETR európio (Eu) e ítrio (Y), Figura 37. O espectro 5 tem na sua composição altos teores de Mn e P, e baixos teores de Ca e ETR ítrio (Y), Figura 38. Entre os espectros 4 e 5, as análises feitas no mesmo cristal evidenciam uma diferença química composicional, o espectro 5 não tem o ETR európio (Eu). A ocorrência da switzerita é proveniente de zona de enriquecimento supergênico, Campos *et al.* (2024).

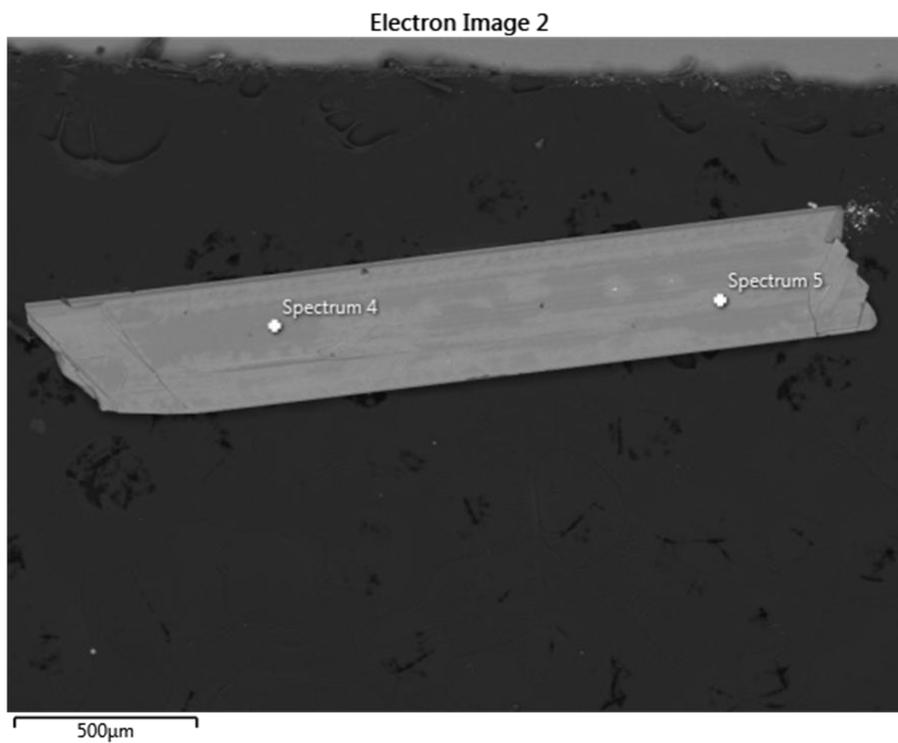
A Tabela 7 representa a composição química das massas de óxidos dos elementos e a identificação do mineral.

**Figura 35** - Cristais de switzerita em matriz de perloffita.



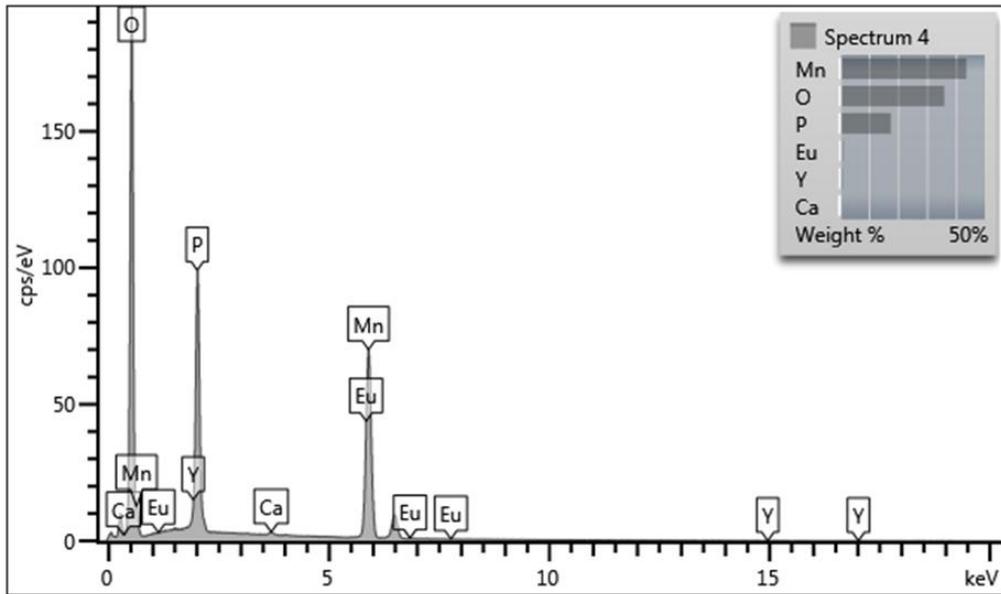
**Fonte:** cedida pelo orientador.

**Figura 36** - Imagem realizada BSE no MEV, amostra de cristal fixado em fita condutora de carbono, switzerita.



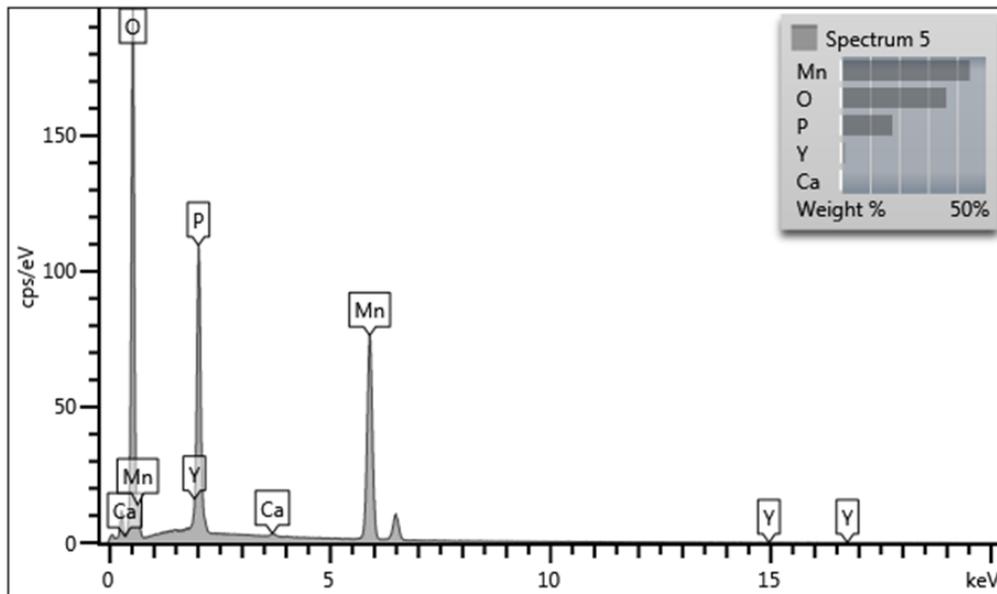
**Fonte:** MEV-BSE.

**Figura 37** - Espectro 4 com a composição química referente ao mineral switzerita.



Fonte: MEV-BSE.

**Figura 38** - Espectro 5 com a composição química referente ao mineral switzerita



Fonte: MEV-BSE.

**Tabela 7** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação do mineral, switzerita.

Spectrum Label	Spectrum 5	Spectrum 4
<b>O</b>		
<b>P</b>	40,76	40,36
<b>Ca</b>	0,32	0,37
<b>Mn</b>	57,33	56,4
<b>Y</b>	1,59	1,4
<b>Eu</b>		1,47
<b>Total</b>	100	100
	switzerita	switzerita

**Fonte:** Autor da obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-BSE.

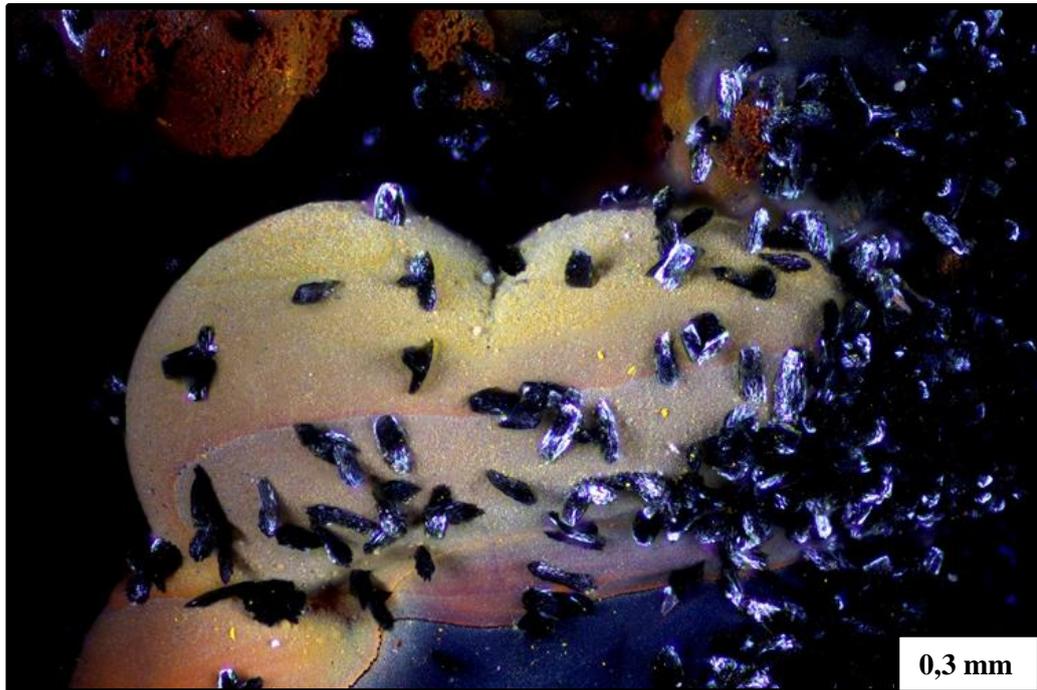
#### 4.2.9 Perloffita

Os espectros 11, 12 e 13 correspondem ao mineral perloffita, que é um fosfato básico de Ba, Fe<sup>3+</sup> e Mn<sup>2+</sup>, Figura 40. Ocorre principalmente como agregados botrioidais e, mais raramente, como prismas monoclinicos. Possui cor marrom, marrom avermelhado ou preta. A presença de perloffita na mina Salitre I corresponde à primeira ocorrência registrada no Brasil. A Figura 39 representa V-Cristais euédricos de perloffita.

Os espectros 11, 12 e 13 têm em suas composições altos teores de Ba, Mn, Fe e P, e baixos teores de Ca, Si e Al, Figuras 41, 42 e 43. A ocorrência da perloffita é proveniente de zona de enriquecimento supergênico, Campos *et al.* (2024).

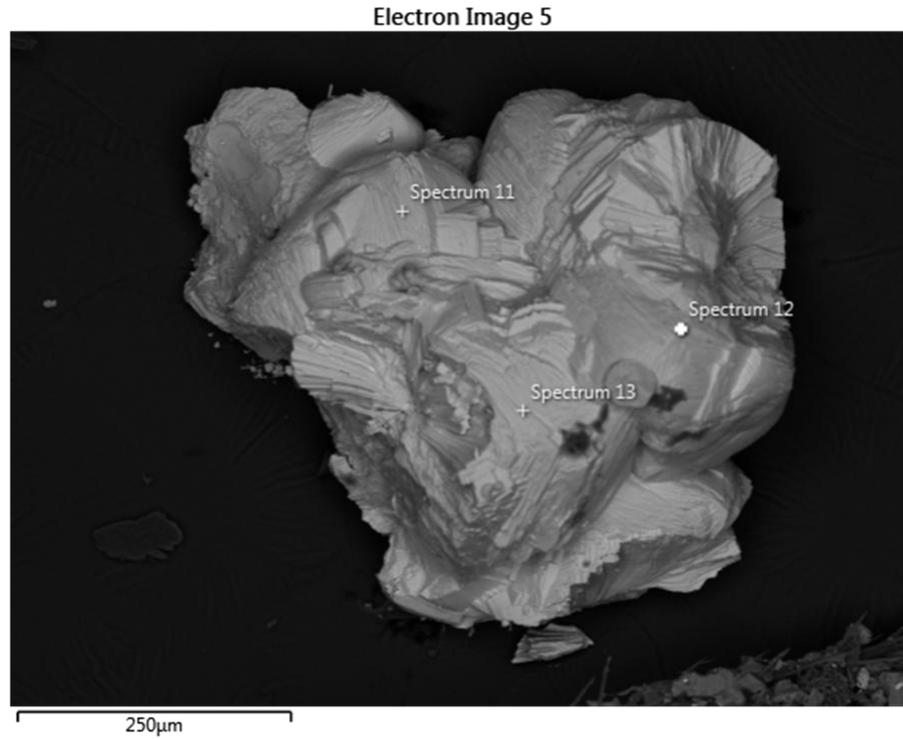
A Tabela 8 representa a composição química das massas de óxidos dos elementos e a identificação do mineral.

**Figura 39** - Cristais euédricos de perloffita. Campo de visão de 5mmx3mm. V-Cristais individuais com aproximadamente 0,3mm.



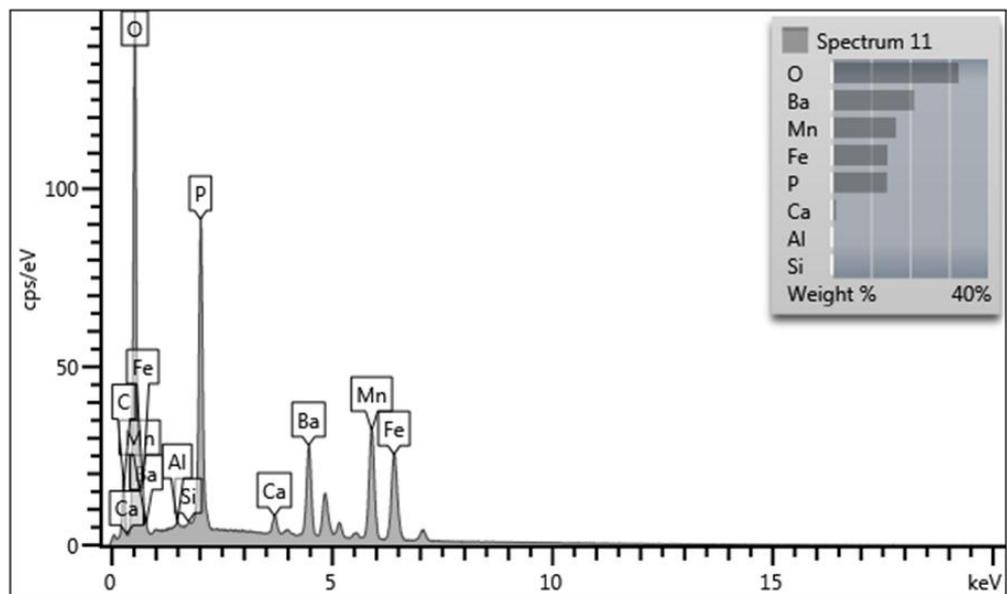
**Fonte:** Fotografia Jhonatan Gomes, cedida ao orientador.

**Figura 40** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada amostras de cristais fixados em fita condutora de carbono , perloffita



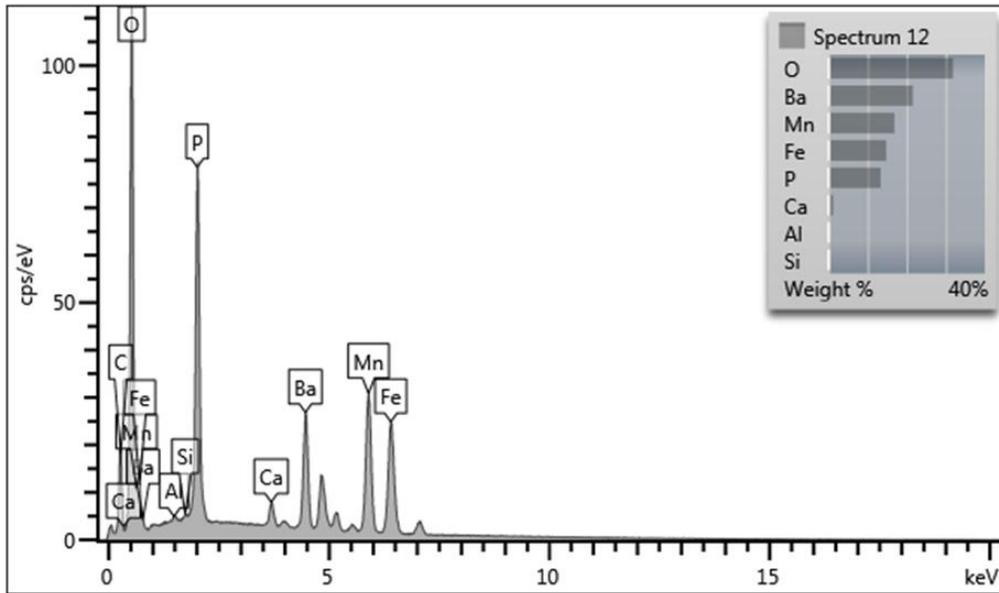
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 41** - Espectro 11 com a composição química referente ao mineral perloffita.



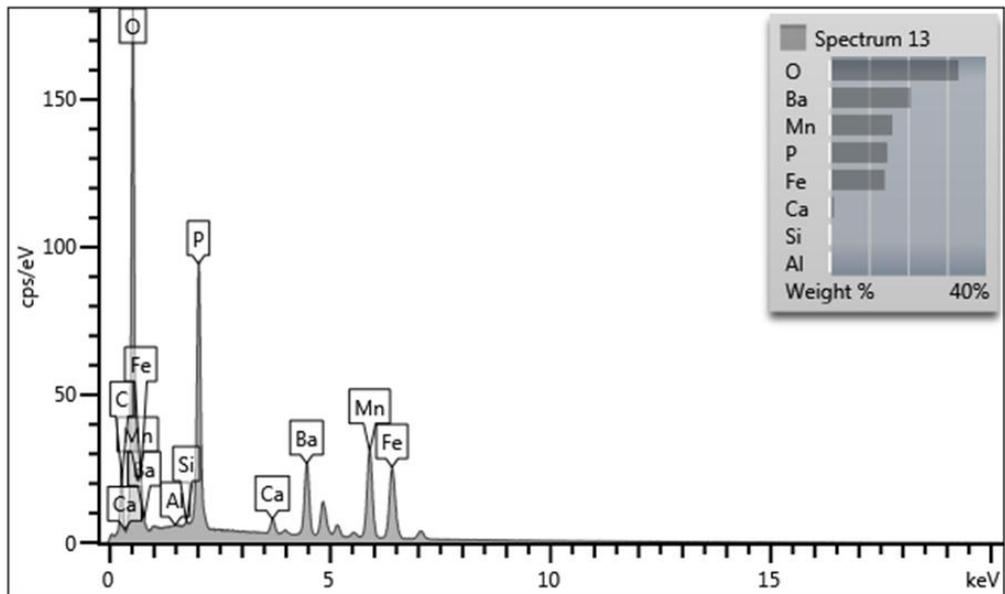
Fonte: MEV-EDS.

**Figura 42** - Espectro 12 com a composição química referente ao mineral perloffita.



Fonte: MEV-EDS.

**Figura 43** - Espectro 13 com a composição química referente ao mineral perloffita.



Fonte: MEV-EDS.

**Tabela 8** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação do mineral, perloffita.

Spectrum Label	Spectrum 13	Spectrum 11	Spectrum 12
<b>O</b>			
<b>Al</b>	0,13	0,4	0,45
<b>Si</b>	0,41	0,31	0,27
<b>P</b>	33,9	32,48	30,59
<b>Ca</b>	1,54	1,57	1,62
<b>Mn</b>	20,72	21,25	21,8
<b>Fe</b>	20,21	20,42	21,16
<b>Ba</b>	23,09	23,57	24,12
<b>Total</b>	100	100	100
	perloffita	perloffita	perloffita

**Fonte:** Autor da Obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-EDS.

#### 4.2.10 Rodocrosita

Os espectros 1, 2 e 3 correspondem ao mineral rodocrosita, um carbonato de Mn, Figura 45. Os cristais de rodocrosita apresentam hábitos escalenoédricos de cor vermelha ou rosa, Figura 44.

O espectro 1 apresenta em sua composição alto teor de Mn e baixos teores de P, Ca e Si, Figura 46. O espectro 2 apresenta em sua composição alto teor de Mn e, baixos teores de Al, Si, P, Ca e Ti, Figura 47. O espectro 3 apresenta em sua composição alto teor de Fe e baixos teores de Mn, Ba, P, Al e Si, Figura 48.

Entre os espectros 1, 2 e 3, as análises feitas no mesmo cristal apresentaram uma diferença química composicional, sendo o Ti presente somente no espectro 2 e o Ba somente no espectro 3. O espectro 3 apresenta uma diferença textural em relação aos demais espectros. O mineral rodocrosita é comum em carbonatitos.

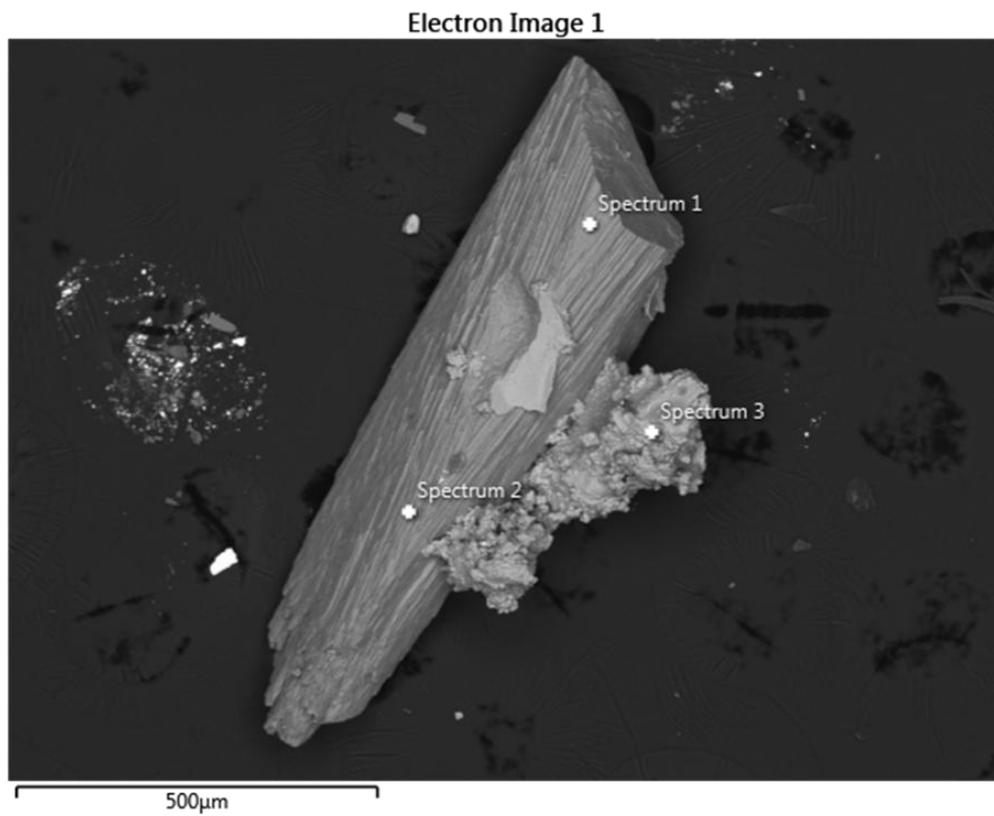
A Tabela 9 representa composição química das massas de óxidos dos elementos e a identificação do mineral.

**Figura 44** - Cristais escalenoédricos de rodocrosita sobre matriz de perloffita e siderita.



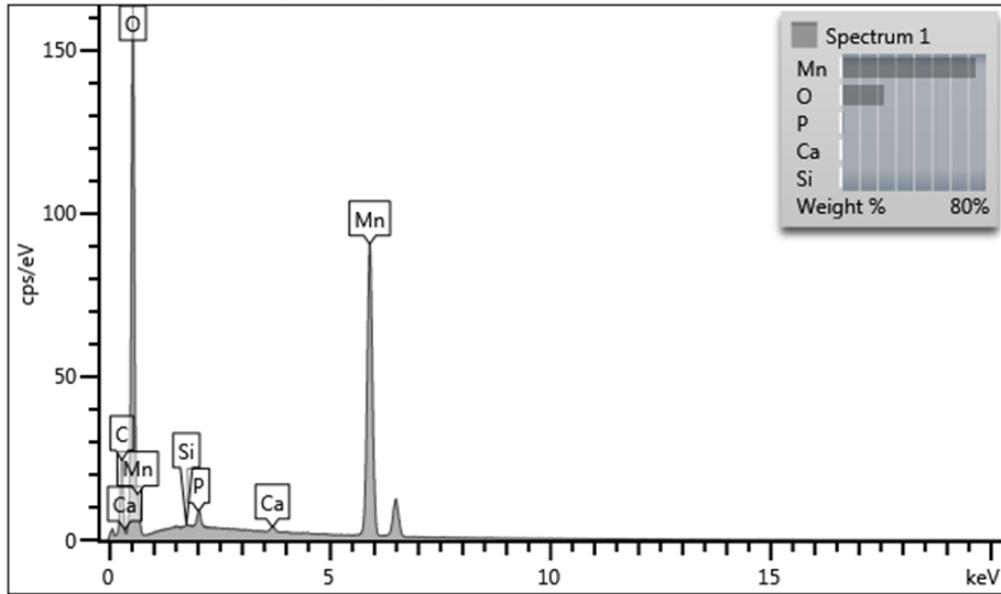
**Fonte:** Cedida pelo orientador.

**Figura 45** - Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada amostras de cristais fixados em fita condutora de carbono, rodocrosita.



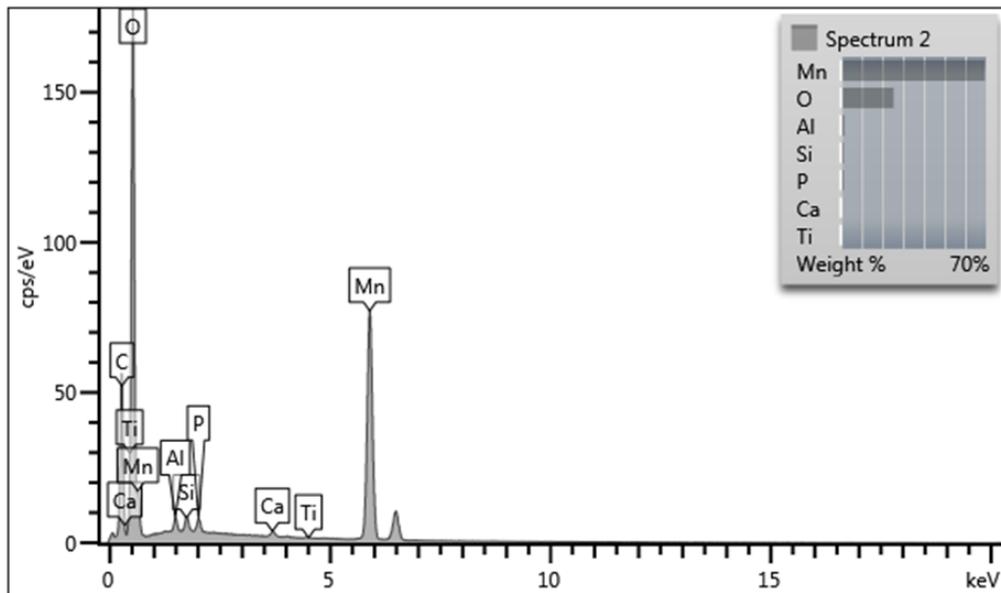
**Fonte:** MEV-EDS.

**Figura 46** - Espectro 1 com a composição química referente ao mineral rodocrosita.

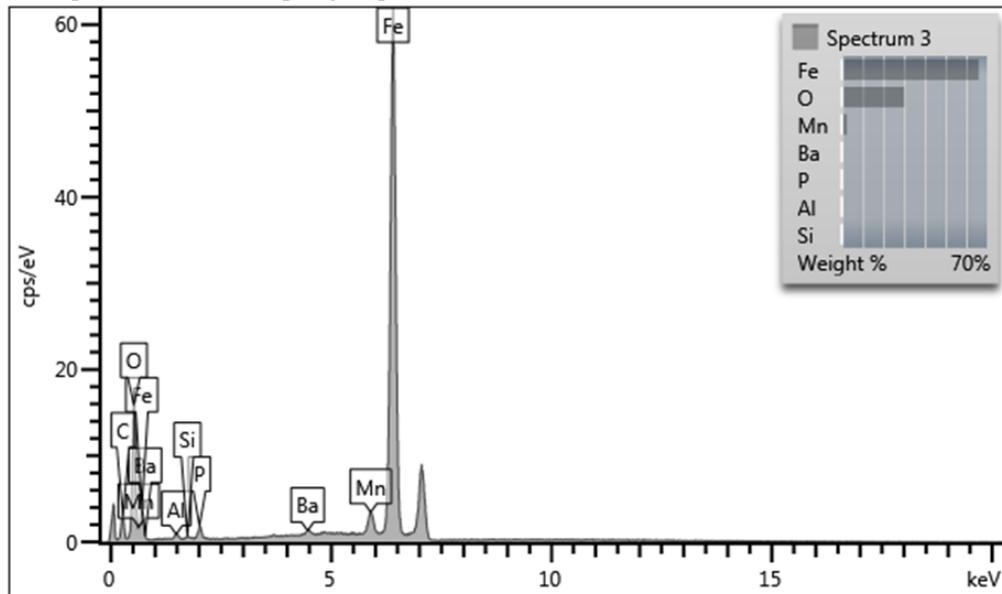


Fonte: MEV-EDS.

**Figura 47** - Espectro 2 com a composição química referente ao mineral rodocrosita.



Fonte: MEV-EDS.

**Figura 48** - Espectro 3 com a composição química referente ao mineral rodocrosita.

Fonte: MEV-EDS.

**Tabela 9** - Composição química das massas de óxidos dos elementos em cada espectro e identificação do mineral, rodocrosita.

Spectrum Label	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
O			
Al		3,11	0,47
Si	0,3	3,05	0,16
P	3,16	3,05	1,06
Ca	0,73	0,87	
Ti		0,18	
Mn	95,81	89,73	3,16
Fe			94,42
Ba			0,74
Total	100	100	100
	rodocrosita	rodocrosita	rodocrosita

Fonte: Autor da obra, com base nos dados fornecidos pelo MEV-EDS.

## 5 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nas análises das amostras do Complexo Alcalino Carbonatito de Serra Negra confirmam uma mineralogia composta principalmente por carbonatos (dolomita, siderita e estroncianita), no entanto, a ocorrência do carbonatito está associada a rochas alcalinas, confirmada pela identificação de minerais como quartzo, plagioclásio e microclina, evidenciando a diversidade na composição modal das amostras estudadas.

O conjunto de lâminas utilizadas para descrição microscópica do trabalho apresentou rochas extremamente alteradas, caracterizadas por feições de hidrotermalismo e laterização, confirmadas pela presença de óxidos de ferro, goethita, óxidos/hidróxido de ferro, estes caracterizados pelo MEV-EDS e provenientes do enriquecimento supergênico. Minerais de fosfato também foram identificados na composição modal utilizando MEV-EDS. São esses: rabdofana-(Ce); um fosfato de cério hidratado; fosfato de cério, vivianita um fosfato de ferro hidratado, com paragênese nas águas fosfatadas com siderita ou sulfetos de ferro. Ambos compõe o modal das amostras.

O método semiquantitativo utilizado, MEV-EDS, cumpriu a classificação química e mineralógica das amostras. O tratamento dos dados que foram gerados em massa de óxido dos elementos e cálculo de conversão dessas massas para elementos puros foi possível identificar o mineral quanto à estrutura química e qual grupo mineral foi classificado. Isso foi feito com os carbonatos, o que resultou na sua classificação no grupo da dolomita, estes que também foram plotados em dois diagramas de classificação ternário. O tratamento dos dados gerados e a mesma metodologia citada acima foram utilizadas para determinar a estrutura química e classificar os minerais geikielita, um óxido de titânio e magnésio, e ilmenita, um óxido de ferro e titânio. O mineral vivianita também foi identificado com esses dados gerados pelo MEV-EDS e classificado com auxílio do banco de dados do mindat.org<sup>1</sup>. O mesmo foi feito para identificar o carbonato de ferro siderita do grupo da calcita.

Utilizando o MEV-EDS, foi possível identificar minerais de ocorrência rara, switzerita, um fosfato hidratado de Mn raro, que ocorre proveniente do enriquecimento supergênico, do qual ocorre também o mineral fosfato básico de Ba, Fe<sup>3+</sup> e Mn<sup>2+</sup>, perloffita, com a primeira ocorrência registrada no Brasil na mina Salitre I, complexo Alcalino-Carbonatítico. O carbonato de manganês rodocrosita também foi identificado na mesma mina.

A identificação dessas fases minerais de rara ocorrência contribui para a ampliação do conhecimento sobre o Complexo Alcalino Carbonatito de Serra Negra, corroborando com estudos anteriores, como a dissertação de mestrado Grasso (2010), que destacam as

características da região do contato de rochas ultramáficas com o quartzito da rocha encaixante. Essas intrusões ígneas em contato com rochas metassedimentares e, junto aos processos hidrotermais e de laterização, enriquecimento supergênico, desempenharam um papel significativo na modificação mineral dessas rochas, promovendo a formação de novas paragêneses minerais e revelando interações complexas entre fluidos e minerais preexistentes.

A ampla variação mineralógica nas porcentagens modais, revela a heterogeneidade nos processos pós-magmáticos que atuaram sobre o Complexo Alcalino Carbonatito.

Assim, os resultados deste estudo somam e ampliam a outros já realizados. Portanto, o entendimento prévio sobre a mineralogia da área também oferece novas possibilidades para pesquisas futuras relacionadas à evolução geológica da região, incluindo investigações mais aprofundadas sobre os processos hidrotermais e as condições físico-químicas que propiciaram a formação das fases minerais raras.

## 6 CONCLUSÕES

Este estudo possibilitou uma análise aprofundada da mineralogia e petrografia das lâminas do Complexo Alcalino Carbonatito de Serra Negra, destacando sua importância científica devido à presença de minerais fosfatos, fosfatos terras raras, carbonatos e de sua importância econômica devido à composição química típica de sistemas alcalinos carbonatíticos. A utilização de técnicas complementares, como microscopia óptica e análises de EDS realizadas no MEV, foi essencial para a caracterização mineralógica, possibilitando a identificação de minerais que não puderam ser claramente observados por métodos convencionais. O estudo revelou a relevância das descobertas, dado o grau de complexidade geológica do local.

Além de contribuir para o entendimento da geologia local, este estudo estabelece uma base científica para pesquisas futuras, ressaltando a necessidade de investigações mais detalhadas sobre os processos hidrotermais, de laterização e as condições físico-químicas que controlaram a gênese e paragênese dessas rochas. A identificação de minerais pouco comuns representa um avanço no conhecimento dos processos petrogenéticos da região e corrobora a diversidade de estudos já desenvolvidos no local.

Por fim, os resultados obtidos reforçam a importância de abordagens multidisciplinares na caracterização de rochas alcalinas carbonatíticas, demonstrando como a integração de técnicas de estudos e análises pode fornecer informações mais detalhadas sobre a geologia e mineralogia. Assim, este estudo não apenas amplia a compreensão sobre o estudo e valorização científica, mas também contribui cada vez mais para a já valorizada área, assim deixando um estudo que pode servir como base para intensificar e melhorar a exploração econômica dos recursos minerais dessa unidade geológica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, G.; BUSHEE, J.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; REYNOLDS, J.H. **Potassium – argon ages of alkaline rocks from Southern Brazil**. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 31, p. 117-142. 1967.
- BARBOSA, E.S.R. **Mineralogia e Petrologia do Complexo Carbonatítico-Foscorítico de Salitre, MG**. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 434 p. 2009.
- BROD, J.A.; BARBOSA, E.S.R.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; GASPAR, J.C.; DINIZ-PINTO, H.S.; SGARBI, P.B.A.; PETRINOVIC, I.A. The Late-Cretaceous Goiás Alkaline Province (GAP), Central Brazil. In: COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C.B. (Eds.). **Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform**. São Paulo: Edusp, p. 261-316. 2005.
- BROD, J.A.; RIBEIRO, C.C.; GASPAR, J.C.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; BARBOSA, E.S.R.; RIFFEL, B.F.; SILVA, J.F.; CHABAN, N.; FERRARI, A.J.D. Excursão 1. **Geologia e mineralizações dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XLII, Araxá, MG. Anais. p. 1-29. 2004.
- BROD, A.J.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; GASPAR, J.C.; GIBSON, S.A.; THOMPSON, R.N. **Mineral-Chemistry fingerprints of liquid immiscibility and fractionation in the Tapira alkaline-carbonatite complex (Minas Gerais, Brazil)**. In: 8th International Kimberlite Conference, Long Abstracts. 2003.
- CAMPOS, W.G.; SCHOLZ, R; BARBOSA, P.H.B; DINIZ, T.S; TAVARES, S.T.P; BELOTTI, F.M; FARIAS, L.G; SILVA, J.G; ATENCIO, D. **A ocorrência de perloffita e switzerita em zona de enriquecimento supergênico no Complexo Alcalino Salitre I, Patrocínio, Minas Gerais. 2024, Anais**. Belo Horizonte: SBG, 2024. p. 1423. Disponível em: <https://51cbg.com.br/site/cbg2024/anais>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- CORDEIRO, P.F.O.; BROD, J.A.; DANTAS, E.L.; BARBOSA, E.S.R. **Mineral chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil**. *Lithos*, v. 118, p. 223-237. 2010.
- GIBSON, S.A.; THOMPSON, R.N.; LEONARDOS, O.H.; DICKIN, A.P.; MITCHELL, J.G. **The Late Cretaceous Impact of the Trindade Mantle Plume - Evidence from Large-**

**Volume, Mafic, Potassic Magmatism in SE Brazil.** *Journal of Petrology*, v. 36, n. 1, p. 189-229. 1995.

GIBSON, S.A.; THOMPSON, R.N.; WESKA, R.; DICKIN, A.P.; LEONARDOS, O.H. **Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil.** *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 126, p. 303-314. 1997.

GOMES, C.B.; RUBERTI, E.; MORBIDELLI, L. **Carbonatite complexes of Brazil: a review.** *Journal of South American Earth Sciences*, v. 3, p. 51-63. 1990.

GRASSO, C.B. **Petrologia do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Serra Negra, MG.** Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília. 164 p. 2010.

LE MAITRE, R.W. (Ed.). **Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks.** 2nd ed. *Geological Magazine*, v. 140, n. 3, p. 367-367. 2002.

MACHADO, J. D.L. 1992. **Geologia do complexo alcalinocarbonatítico de Catalão II (GO).** In: Congresso Brasileiro de Geologia, Extended Abstracts Boletim, São Paulo, Brazil, p. 94-95. 1992.

MARCIANO, A.N.; MARCHETTO, M. **Serra Negra and Salitre - carbonatite alkaline igneous complex.** In: LEONARDOS, O.H.; MEYER, H.O.A.; GASPAR, J.C. (Eds.). 5th International Kimberlite Conference. Special Publication 3/91. CPRM, Araxá, Brazil. p. 75-79. 1991.

MINDAT. Geikielite **Mindat.org**, 2023. Disponível em: <https://www.mindat.org/min-1670.html>. Acesso em: 23 abr. 2025.

MINDAT. Imenite. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: <https://www.mindat.org/min-2013>. Acesso em: 23 abr. 2025.

MINDAT. Rhabdophane-(Ce). **Mindat.org**, 2023. Disponível em: <https://www.mindat.org/min-3400>. Acesso em: 23 abr. 2025.

MINDAT. Vivianite **Mindat.org**, 2023. Disponível em: <https://www.mindat.org/min-4194>. Acesso em: 23 abr. 2025.

MITCHELL, R.H. **Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry and Petrology**. New York: Plenum Press. 552 p. 1986.

MITCHELL, R.H. **Carbonatites and Carbonatites and Carbonatites**. The Canadian Mineralogist, v. 43, p. 2049–2068. 2005.

PALMIERI, M. **Modelo Geológico e Avaliação de Recursos Minerais do Depósito de Nióbio Morro do Padre, Complexo alcalino-carbonatítico Catalão II, GO**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 130 p. 2011.

RIBEIRO, C.C. **Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do Complexo Carbonatítico de Catalão I, GO**. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 473 p. 2008.

RIBEIRO, C.C.; BROD, J.A.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; GASPAR, J.C.; PETRINOVIC, I.A. **Mineralogical and field aspects of magma-fragmentation deposits in a carbonate-phosphate magma chamber: evidence from the Catalão I Complex, Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 18, p. 355-369. 2005.

SEER, H.J. **Evolução Tectônica dos Grupos Araxá e Ibiá na Sinforma de Araxá-MG**. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 267 p. 1999.

STRECKEISEN, A.L. **Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites, and melilitic rocks: Recommendations and suggestions of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks**. Geology, v. 7, p. 331-335. 1979.

WOOLLEY, A.R., KJARSGAARD, B.A. **Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database**. Canadian Mineralogist 46: 741 - 752. 2008.