



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



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS DE NOVO HORIZONTE,  
BAHIA**

**Deilson José da Silva Arcanjo**

**MONOGRAFIA nº 305**

Ouro Preto, dezembro de 2018



**CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS  
DE NOVO HORIZONTE, BAHIA**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. Issamu Endo

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Hernani Mota Lima

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. Dr. Marco Antônio Fonseca



# **MONOGRAFIA**

**Nº 305**

## **CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS DE NOVO HORIZONTE, BAHIA**

**Deilson José da Silva Arcanjo**

*Orientador*

**Prof. MSc. Edison Tazava**

*Co-Orientador*

**Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2018/2.

**OURO PRETO**

**2018**

---

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>  
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>  
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>  
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita  
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais  
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Deilson José da Silva Arcanjo

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

A668c Arcanjo, Deilson José da Silva.  
Caracterização dos minerais de terras raras de Novo Horizonte, Bahia  
[manuscrito] / Deilson José da Silva Arcanjo. - 2018.  
36f.: il.: color; graf; tabs; mapas.  
Orientador: Prof. MSc. Edison Tazava.  
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz .  
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
Minas. Departamento de Geologia.  
1. Mineralogia. 2. Terras raras. I. Tazava, Edison. II. Scholz , Ricardo  
Augusto . III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.  
CDU: 553.493

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br)

## Ficha de Aprovação

---

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO:** CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS DE NOVO HORIZONTE - BA

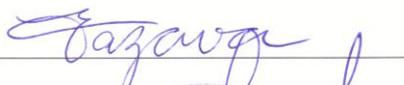
**AUTOR:** Deilson José da Silva Arcanjo

**ORIENTADOR:** Edison Tazava

**Aprovada em:** 13 de dezembro de 2018

#### BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc. Edison Tazava



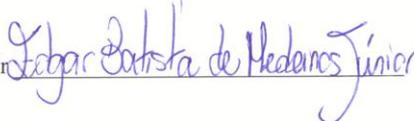
DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Leonardo Martins Graça



DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Edgar Batista de Medeiros Jr



DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 13/12/2018



## **Agradecimentos**

---

Agradeço a minha mãe Efigênia e ao meu Pai José João que são os meus alicerces e que estiveram e estão ao meu lado, sempre me dando apoio nos momentos bons e nos ruins. Agradeço à minha Vó, aquela que carinhosamente chamo de “vovozinha” e que sempre orou por mim e me deu forças para conseguir alcançar os meus objetivos. Agradeço aos meus tios e tias que sempre me motivaram e me impulsionaram de forma a perseguir meus sonhos. Agradeço a minha irmã Karina que sempre me apoiou nos meus sonhos e agradeço também a minha namorada Tamires pela paciência, sabedoria, carinho, apoio e amor, características que se mantiveram firmes e constantes mesmo nos momentos em que eu estava nervoso, cansado, impaciente. Agradeço ao Toninho pelo apoio em topografia, pelos estudos e trabalhos realizados.

# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>ix</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO .....	1
1.3 OBJETIVOS .....	2
1.4 JUSTIFICATIVA .....	2
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS .....	3
1.5.1 Revisão bibliográfica .....	3
1.5.2 Coleta de amostras .....	3
1.5.3 Confecção de seções delgadas polidas .....	5
1.5.4 Análise laboratorial .....	5
<b>2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL</b> .....	<b>8</b>
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO .....	8
2.1.1 Bacia Chapada Diamantina .....	8
2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO .....	9
<b>3 FORMAÇÃO DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS</b> .....	<b>14</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	14
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>18</b>
4.1 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA DE SEÇÕES DELGADAS POLIDAS .....	18
Seção L1.....	18
Seção L2.....	19
Seção L3.....	20
Seção L4.....	21
4.2 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	23
Amostra AMT1.....	23
Amostra AMT2.....	24
Amostra AMT3.....	24
Amostra AMT4.....	25

4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS VIA MICROSSONDA ELETRÔNICA .....	26
Amostra AMT1.....	26
Amostra AMT3.....	27
4.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS VIA MEV-EDS .....	28
Amostra AMT2.....	28
Amostra AMT4.....	29
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>35</b>

## INDÍCE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1</b> - Localização da área de estudo.....	2
<b>Figura 1.2</b> - Local da coleta de amostras .....	4
<b>Figura 1.3</b> - Amostras coletadas nos arredores da cidade de Novo Horizonte - BA .....	4
<b>Figura 2.1</b> - Mapa dos domínios geotectônicos da Serra do Espinhaço.....	9
<b>Figura 2.2</b> - Mapa geológico da região de Novo Horizonte (BA)....	12
<b>Figura 4.1</b> - Fotomicrografia da seção L1. A) Luz polarizada plana; B) Luz polarizada cruzada .....	19
<b>Figura 4.2</b> - Fotomicrografia da seção L2. A) Luz polarizada plana; B) Luz polarizada cruzada .....	20
<b>Figura 4.3</b> - Fotomicrografia da seção L3. A) Luz polarizada plana; B) Luz polarizada cruzada .....	21
<b>Figura 4.4</b> - Fotomicrografia da seção L4. A) Luz polarizada plana; B) Luz polarizada cruzada .....	22
<b>Figura 4.5</b> - Fotomicrografia da seção L4 à luz polarizada cruzada evidenciando cristais anédricos .....	22
<b>Figura 4.6</b> - Difratoograma da amostra AMT1 .....	23
<b>Figura 4.7</b> - Difratoograma da amostra AMT2 .....	24
<b>Figura 4.8</b> - Difratoograma da amostra AMT3 .....	25
<b>Figura 4.9</b> - Difratoograma da amostra AMT4 .....	25
<b>Figura 4.10</b> - Ponto analisado na amostra AMT1 .....	26
<b>Figura 4.11</b> - Pontos analisados na amostra AMT3 .....	27
<b>Figura 4.12</b> - Pontos analisados na amostra AMT2.....	28
<b>Figura 4.13</b> - Pontos analisados na amostra AMT4.....	29

## ÍNDICE DE TABELAS

---

<b>Tabela 2.1</b> - Estratigrafia do Domínio Chapada Diamantina. ....	10
<b>Tabela 2.2</b> - Estratigrafia proposta para o Supergrupo Espinhaço. ....	11
<b>Tabela 4.1</b> - Análise quantitativa na amostra AMT1.....	26
<b>Tabela 4.2</b> - Análise quantitativa na amostra AMT3.....	28
<b>Tabela 4.3</b> - Análise semi-quantitativa na amostra AMT2, ponto 19.....	29
<b>Tabela 4.4</b> - Análise semi-quantitativa na amostra AMT4, pontos 75, 76 e 77.....	30



## Resumo

---

Elementos terras raras são importantes insumos para diversos ramos da indústria, com destaque para cerâmicas semi e supercondutoras, eletrônicos e catalisadores. Os principais depósitos mundiais localizam-se na China, sendo esse país também o principal consumidor. Recentemente, identificaram-se minerais portadores de elementos terras raras associados a veios de quartzo hidrotermal em Novo Horizonte, Bahia. Tais veios cortam rochas metavulcânicas do Grupo Rio dos Remédios. Esses minerais ocorrem associados a outros minerais de origem hidrotermal como quartzo, rutilo, hematita e almeidaíta. Neste trabalho, foi realizada a caracterização mineralógica detalhada dos minerais portadores dos elementos terras raras, e se identificou monazita-(Ce), parisita-(La) e bastnaesita-(Ce). Verificou-se que tais minerais ainda apresentavam enriquecimento em outros elementos terras raras como praseodímio (Pr) e neodímio (Nd). A identificação destes elementos pode fornecer informações importantes para a exploração de tais minerais e alavancar a produção de elementos terras raras pela indústria brasileira.

**Palavras chave:** elementos terras raras, Formação Novo Horizonte, Grupo Rio dos Remédios.



## Abstract

---

Rare earth elements are important for different industries, mainly semi and superconducting pottery, electronics and catalysts. The main deposits are found in China, country that has the biggest consumer demand too. Rare earth element-bearing minerals have been found in hydrothermal quartz veins in *Novo Horizonte* Formation, Bahia state, Brazil. These veins cross metavulcanic rocks within *Rio dos Remédios* Group. In association with the rare earth elements-bearing minerals, there are other hydrothermal minerals, such as quartz, rutile, hematite and almeidaite. This work presents the mineralogical characterization of rare earth elements-bearing minerals, what led to the identification of monazite-(Ce), parisite-(La) and bastnäsite-(Ce). These minerals also have significant amounts of praseodymium (Pr) and neodymium (Nd). Recognizing and quantifying these elements can provide important information for mining companies which deal with them, perhaps increasing the brazilian production of rare earth elements.

**Keywords:** rare earth elements, *Novo Horizonte* Formation, *Rio dos Remédios* Group.



### 1.1 APRESENTAÇÃO

A região de Novo Horizonte (BA) encontra-se na porção central do estado onde afloram rochas da formação homônima, pertencentes ao Grupo Rio dos Remédios. A Formação Novo Horizonte é composta por rochas vulcânicas/subvulcânicas ácidas e vulcanoclásticas (Guimarães *et al.* 2005), dentre as quais há rochas hidrotermalizadas que contêm minerais de elementos terras raras associados (Horta *et al.* 2016).

Veios de quartzo ricos em drusas ou monocristais de quartzo com inclusões de rutilo e/ou hematita especular são explorados desde a década de 1990 nas proximidades da cidade de Novo Horizonte, na borda oeste da Chapada Diamantina (Chaves 2016), e tais veios são associados a minerais portadores de elementos terras raras, como monazita-(Ce), monazita-(La), bastnaesita-(La), rabdofânio-(La) e xenotímio-(Y).

Elementos terras raras (ETR) são os elementos escândio (Sc), ítrio (Y) e os elementos que vão desde o lantânio (La) ao lutécio (Lu). Os ETR são eletropositivos e, do ponto de vista da mineralogia, tais elementos têm a tendência de formar óxidos, haletos, carbonatos, fosfatos e silicatos, poucos boratos e arsenatos, mas não sulfetos (Jones *et al.* 1996).

Os elementos terras raras são divididos em três grupos (Rosental 2005): leves, médios e pesados. Os elementos terras raras leves (ETRL) são representados pelo lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr) e neodímio (Nd); os elementos terras raras médios (ETRM) são samário (Sm), európio (Eu) e gadolínio (Gd); térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Tb), lutécio (Lu) e ítrio (Y) compõem o grupo dos elementos terras raras pesados (ETRP)

Este trabalho consiste, no estudo dos minerais que contêm elementos terras raras associados às rochas da Formação Novo Horizonte, Grupo Rio dos Remédios, Supergrupo Espinhaço.

### 1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo localiza-se próximo à cidade de Novo Horizonte (BA) (Figura 1.1), que dista 576,2 km da capital Salvador. Localiza-se na porção oeste do estado, à latitude de 14° 06' 00" Sul, longitude de 39° 22' 00" Oeste, sendo a principal via de acesso à rodovia BA-152. Faz divisa com os municípios de Ibitipanga e Ibitiara.



De acordo com USGS (2007), elementos terras raras possuem grande aplicabilidade em indústrias de alta tecnologia, por exemplo, na produção de células fotovoltaicas, turbinas eólicas, craqueamento de petróleo, além de transportes de alta velocidade e ímãs permanentes.

É sabido da presença de minerais portadores de elementos terras raras nas rochas da Formação Novo Horizonte (Horta *et al.* 2016), porém, ainda pouco se conhece sobre a mineralogia destes minerais e sobre a petrografia das rochas da formação supracitada, o que justifica este trabalho.

## **1.5 MATERIAIS E MÉTODOS**

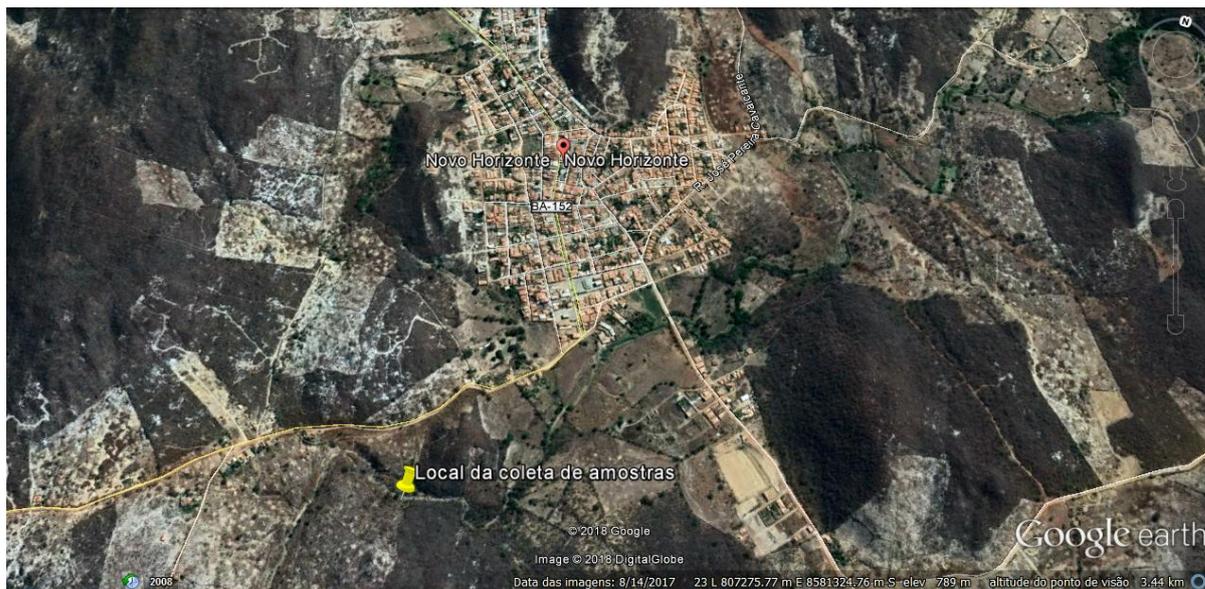
O trabalho de conclusão de curso foi elaborado conforme as etapas descritas a seguir:

### **1.5.1 Revisão bibliográfica**

A principal referência bibliográfica consiste no relatório integrado do Projeto Ibitiara-Rio de Contas (Guimarães *et al.* 2005), projeto este concebido pelo Programa Geologia do Brasil, que retomou os levantamentos geológicos básicos no país. Esse projeto abarca 21 municípios do Estado da Bahia, desenvolvido na região do Espinhaço-Chapada Diamantina. Outra inestimável fonte de consulta, foi o livro *Rare Earth Minerals. Chemistry, origin and ore deposits* (Jones, A. P., Wall, F. & Williams, T. 1996), por possuir estudos sobre os elementos e os respectivos minerais portadores de elementos terras raras nos diferentes modos de ocorrência. Visando ainda a compreensão da química e dos modos de ocorrência dos minerais de elementos terras raras, realizou-se a leitura de artigos e textos com temas relacionados a geoquímica e petrografia.

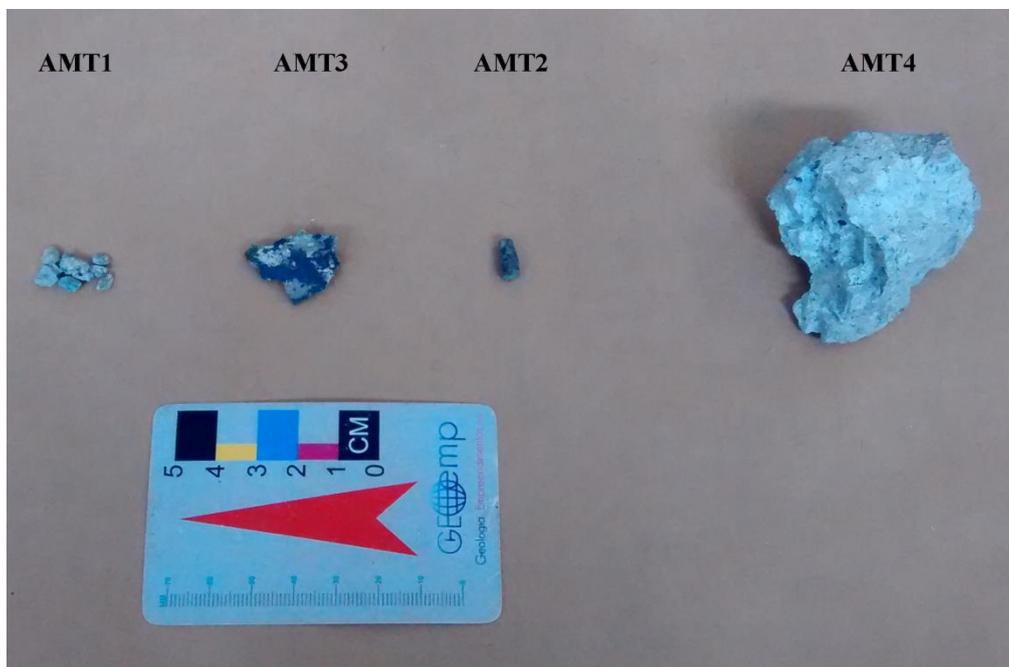
### **1.5.2 Coleta de amostras**

As amostras foram coletadas pelo co-orientador do trabalho, prof. Dr. Ricardo Sholz, nos arredores da cidade de Novo Horizonte – BA, próximo à rodovia BA-152 (Figura 1.2), nas seguintes coordenadas: 12°49'5.86"S e 42°10'9.56"O. Um total de sete amostras sendo a serem posteriormente selecionados para os estudos.



**Figura 1.2** – Local, no município de Novo Horizonte, onde foi realizada a das amostras. Fonte: Google Earth acessado em dezembro de 2018.

Tratam-se de amostras de minerais portadores de elementos terras raras e de rochas hidrotermalizadas presentes na Formação Novo Horizonte (Figura 1.3).



**Figura 1.3** - Amostras selecionadas a partir das amostras coletadas nos arredores da cidade de Novo Horizonte – BA.

### **1.5.3 Confeção de seções delgadas polidas e fotomicrografias**

A partir da amostra de rochas, foram confeccionadas, no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia (LAMIN – DEGEO), quatro seções delgadas polidas (L1 à L4) para realizar a descrição mineralógica detalhada sob luz transmitida. A partir da descrição mineralógica, uma das quatro seções foi selecionada (renomeada AMT4), segundo critérios de alteração hidrotermal e presença de minerais de elementos terras raras, para a realização de difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura e análise semi-quantitativa por espectrometria de raios X por dispersão de energia (MEV-EDS) afim de se estudar detalhadamente a mineralogia de interesse.

As fotomicrografias das seções delgadas polidas, L1, L2, L3 e L4, foram realizadas no MICROLAB-DEGEO.

### **1.5.4 Análise laboratorial**

Foram analisadas, no Laboratório de Difratometria de Raios X do Departamento de Geologia – DEGEO/UFOP, quatro amostras: três monocristais de minerais (AMT1, AMT2 e AMT3) e uma rocha (AMT4) (Figura 1.3). As análises foram realizadas no Difratômetro da PANalytical, modelo EMPYREAN. Esse possui anodo de Cobre para a geração de raios X, conforme os seguintes parâmetros de tensão e corrente: 45 kV e 40 mA. Todas as análises efetuadas na fração pó total, à temperatura de 25°C com o goniômetro variando de 2° até 70°. A interpretação dos resultados foi efetuada no *software* X'pert HighScore Plus (versão 3.0.0) da PANalytical, que possui um banco de dados completo para identificação de minerais, cerâmicas, cimentos, metais, dentre outros compostos e fases.

A caracterização mineralógica e química dos minerais portadores de elementos terras raras via microsonda eletrônica realizada nas amostras AMT1 e AMT3 foram efetuadas no Instituto de Geociências – IGC da Universidade de Minas Gerais – UFMG pelo co-orientador desse trabalho. As análises foram realizadas na microsonda eletrônica Jeol, modelo JXA 8900RL WD/ED *Combined Microanalyzer*, que é capaz de quantificar e identificar até 20 elementos em um único ponto da análise, em áreas pequenas como 5 microm de diâmetro. O equipamento trabalha com tensões da ordem de 0,2 a 40 KV no qual é possível detectar elementos numa faixa entre o flúor e o urânio.

A caracterização mineralógica e química dos minerais de terras raras realizada nas amostras AMT2 e AMT4 foram realizadas no Laboratório de Microscopia e microanálises no departamento de

Geologia – DEGEO da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. A amostra AMT2 consiste de um grão mineral e a amostra AMT4 um fragmento de metarriolito hidrotermalizado, levadas ao MEV e realizado o imageamento através de elétrons retroespalhados e feita a análise química semi-quantitativa via a técnica EDS. As análises foram realizadas no equipamento da JEOL, modelo JSM-6510 e, acoplado ao MEV o detector de EDS da Oxford modelo X-MAX. As análises foram realizadas nas condições de aceleração de 20 kV, à “work distance” de 10mm, “spot size” de 70.



## CAPÍTULO 2

### CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

---

#### 2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

As amostras foram coletadas numa área localizada no domínio geotectônico da Chapada Diamantina, parte da cadeia montanhosa da Serra do Espinhaço (Figura 2.1), que se estende no sentido norte-sul desde a porção leste do Quadrilátero Ferrífero até a divisa entre os estados da Bahia e do Piauí (Chaves *et al.* 2017).

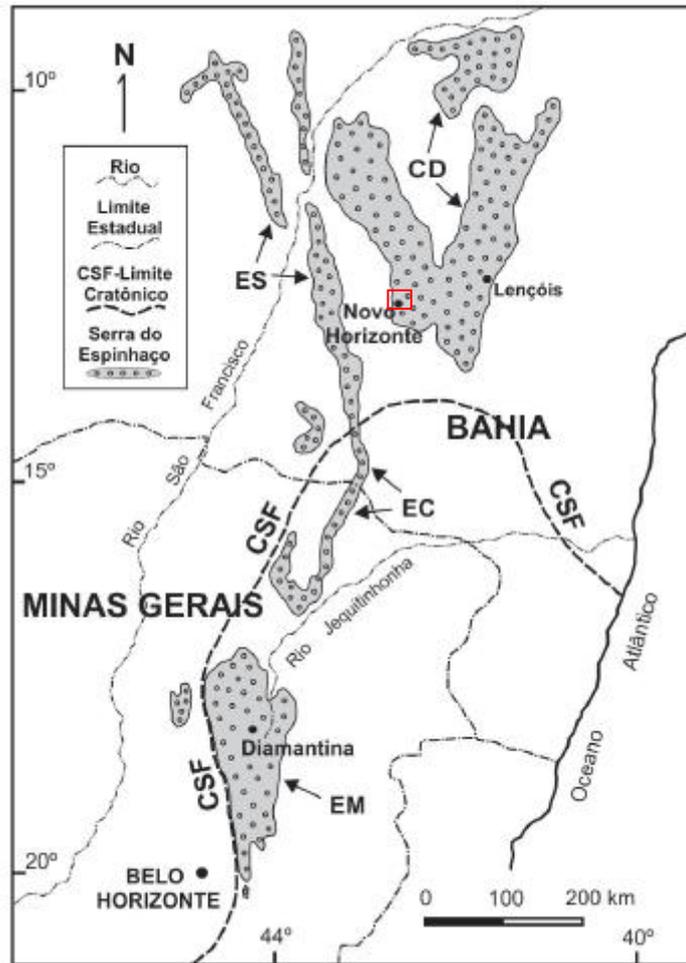
Segundo Guimarães *et al.* (2005), os estados de Minas Gerais e Bahia, no Estateriano, experimentaram o processo de tafrogênese, que resultou em sistemas de riftes intracontinentais que deram origem à bacias preenchidas por rochas magmáticas e sedimentares, representantes precoces do Supergrupo Espinhaço.

##### 2.1.1 Bacia Chapada Diamantina

A cidade de Novo Horizonte está inserida na parte oeste do domínio fisiográfico da Chapada Diamantina (CD) e, para Guimarães *et al.* (2005), neste domínio convergem diversas feições geológicas que constituem testemunhos de atividades tectônicas, vulcânicas e sedimentares.

Com relação à tectônica formadora, de acordo com Silva (1994), a bacia está depositada sobre crosta continental em uma área com movimentos divergentes de placas, com o grupo Rio dos Remédios sendo representado por um modelo de bacia do tipo IF - fratura interior do continente, mencionado anteriormente por Siqueira (1978) e Dominguez (1993). Esse modelo transicionou para o tipo IS (sinéclese interior do continente) a partir da deposição das formações Oricuri do Ouro e Mangabeira.

Segundo a concepção de Silva (1994) o domínio da Chapada Diamantina corresponde a uma bacia do tipo rifte-sinéclese, no qual o estágio rifte da bacia seria representado pelo vulcanismo do Grupo Rio dos Remédios e o estágio sinéclese pelos depósitos continentais e marinhos dos grupos Paraguaçu e Chapada Diamantina, este último pelas formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu.

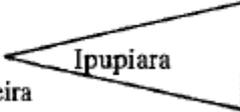


**Figura 2.1** - Mapa dos domínios geotectônicos e geográficos da Serra do Espinhaço, no qual EM – Espinhaço Meridional, EC – Espinhaço Central, ES – Espinhaço Setentrional e CD – Chapada Diamantina. A cidade de Novo Horizonte localiza-se no domínio da Chapada Diamantina (CD). Chaves *et al.* 2017.

## 2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO

De acordo com Silva (1994), afloram no domínio da Chapada Diamantina o Complexo Rio dos Remédios (marcado por dois domínios litológicos, um de origem vulcânica e outro sedimentar) e os grupos Paraguaçu, Chapada Diamantina e Una, dos quais os primeiros pertencem ao Supergrupo Espinhaço e o último ao Supergrupo São Francisco (Tabela 2.1). O Complexo Rios dos Remédios é composto por riolitos, traquitos, dacitos, tufitos, aglomerados e brechas vulcânicas provenientes de derrames vulcânicos através do rifteamento da crosta, além de arenitos com granulometria bimodal, cuja interpretação é condicionada a dunas e interdunas de ambiente desértico (Pedreira *et al.* 1989).

**Tabela 2.1** – Estratigrafia do domínio Chapada Diamantina (CD). Na base, o Complexo Rio dos Remédios. Fonte: Pedreira *et al.* (1989).

SUPERGRUPO	GRUPO	FORMAÇÃO
Espinhaço	Chapada Diamantina	Morro do Chapéu Caboclo Jacuípe <i>Flints</i> Tombador
	Paraguaçu	Guiné Mangabeira Ouricuri do Ouro 
	Rio dos Remédios	(não dividido em formações)

Guimarães *et al.* (2005) objetivavam, entre outras coisas, propor uma nova coluna estratigráfica para o Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina. Com relação do Complexo Rio dos Remédios, o autor e colaboradores o colocam na categoria de Grupo e o subdividem, da base para o topo, em Formação Novo Horizonte e Formação Lagoa de Dentro/Formação Ouricuri do Ouro (Tabela 2.2), sendo essa última representada por depósitos sedimentares.

**Tabela 2.2** – Estratigrafia proposta para o Supergrupo Espinhaço pré e pós o Projeto Ibitiara-Rio de Contas (2005). Fonte: Guimarães *et al.* (2005).

Projeto Ibitiara-Rio de Contas (2005)	
Gr. Chap. Diamantina	Formação Caboclo
	Formação Tombador
Grupo Paraguauçu	Formação Açurúá
	Formação Mangabeira
Grupo Rio dos Remédios	Fm. Ouricuri do Ouro
	Fm. La. de Dentro
	Formação Novo Horizonte
Fm. Serra da Gameleira	

Ainda de acordo com Guimarães *et al.* (2005) a formação Novo Horizonte pode ser definida como tectonossequência Novo Horizonte e compreende o agrupamento de litofácies vulcânica, subvulcânica, piroclástica e epiclástica de derivação vulcânica (Figura 2.2).

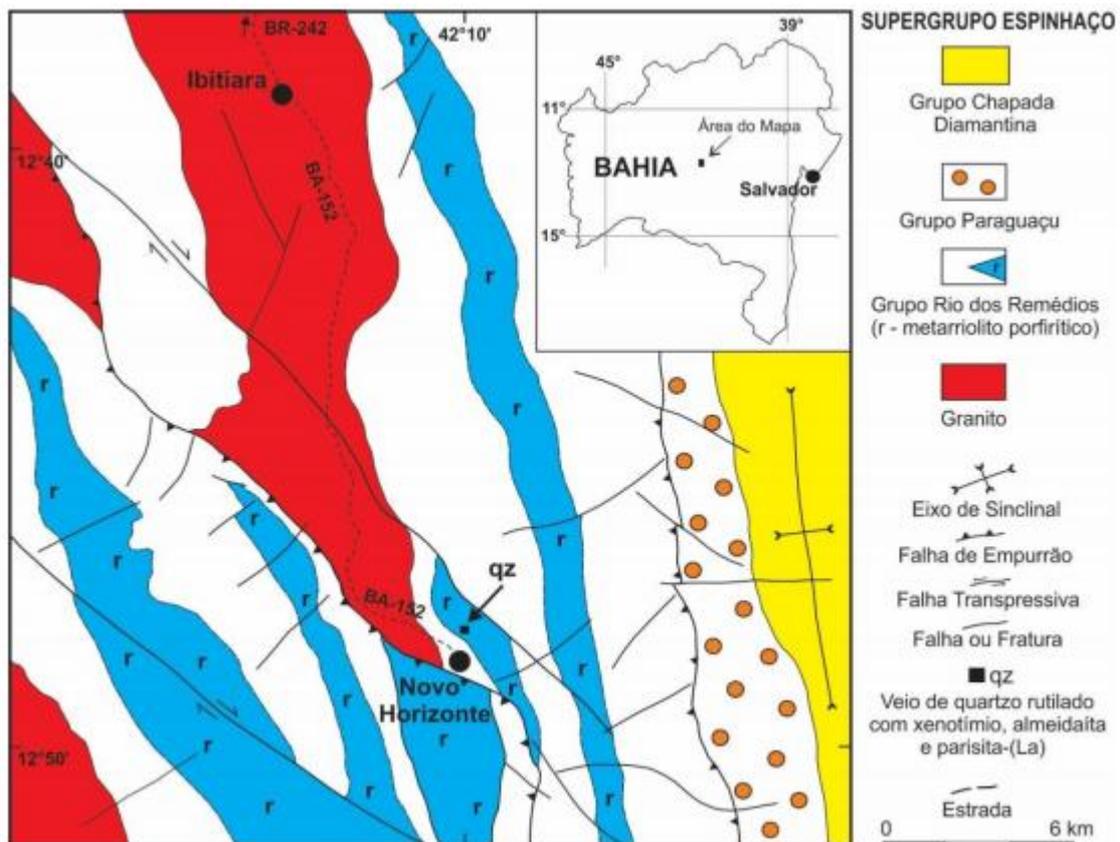


Figura 2.2 - Mapa geológico da região de Novo Horizonte (BA) Chaves *et al.* (2018).

As metavulcânicas da Formação Novo Horizonte apresentam altos teores de U, Th e K e estão bastante alteradas pela ação de fluidos magmáticos, primários ou secundários, de origem meteórica ou decorrentes de reações metamórficas e hidrotermais em eventos tectônicos posteriores, como potassificação, propilitização, sericitização, greisenização e, em menor proporção, silicificação. Outro fator de transformação das rochas da formação supracitada é a deformação, dando origem a sericita xistos, sericita-quartzo xistos, milonitos e ultramilonitos gerados por zonas de cisalhamento e que são responsáveis pelas mineralizações de cassiterita, ouro, barita e quartzo rutilado, cuja maioria se concentra nas rochas dessa formação (Guimarães *et al.* 2005). Segundo Barbosa (2012), as litologias desta unidade correspondem à metadacitos, metarriolitos, metaquartzos pórfiros e metaandesitos, em geral, bastante modificadas pela deformação e pela ação de fluidos de origem magmática e metamórfica.



## CAPÍTULO 3

### FORMAÇÃO DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS

---

#### 3.1 INTRODUÇÃO

De acordo com trabalhos de Teixeira (2005), na região noroeste da Bahia, próximo à cidade de Novo Horizonte, foram encontradas rochas metavulcânicas da formação homônima com feições de alteração hidrotermal, como muscovitização e sericitização, revelando forte presença de fluidos hidrotermais na região. Segundo Santos (2017) a formação de sericita ocorre devido à instabilidade química dos feldspatos na presença de  $H^+$ ,  $OH^-$  e  $K^+$  com quartzo e micas brancas. Ainda de acordo com Santos (2017), o padrão de distribuição dos elementos terras raras para as rochas metavulcânicas ácidas da Formação Novo Horizonte apresenta enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP.

Segundo Jones *et al.* (1996), as baixas concentrações de elementos terras raras nos fluidos hidrotermais implicam na existência de outros mecanismos que levem ao enriquecimento de ETR em ambientes geológicos específicos. Minerais primários de ETR podem ser originados a partir de soluções hidrotermais por quatro mecanismos principais: mudança de temperatura ou pressão nas soluções, mistura de soluções contendo ETR com fluidos de diferentes composições químicas, interação de fluidos com a rocha encaixante e, não menos importante, a cristalização dos minerais de ganga. Em relação aos minerais secundários, o principal mecanismo de formação é a alteração hidrotermal de minerais de elementos terras raras. É importante salientar que a determinação das causas da precipitação dos ETR caracteriza um trabalho de elevada dificuldade, uma vez que os processos envolvendo fluidos hidrotermais e reações químicas são demasiadamente complexas.

Quando soluções quentes migram para a superfície terrestre, há o decaimento da temperatura (T) e da pressão confinante (P) do fluido. Essa redução de P e T pode ocorrer de forma rápida ou não e, à medida que as soluções hidrotermais encontram fraturas, cavidades e poros nas rochas ocorre gradualmente perda de voláteis ( $H_2S$  e  $CO_2$ ) e aumento do pH, induzindo o deslocamento da reação representada pela equação 1 para a direita:



A perda de  $CO_2$  da solução hidrotermal marcaria início a deposição de minerais portadores de elementos terras raras.

A mistura de soluções de diferentes composições químicas podem ocorrer de diferentes formas e ainda envolver mais de duas soluções na mistura. Para uma mistura entre duas soluções

hidrotermais, existem quatro possibilidades de resultados, podendo ocorrer: diluição isotérmica da solução salina, diluição e resfriamento da solução salina, mistura isotérmica das duas soluções ou mistura das duas soluções e arrefecimento (Jones *et al.* 1996). Esse mecanismo de mistura de fluidos como possível recurso de deposição de minerais de terras raras foi verificado em sistemas hidrotermais ativos, com temperaturas da ordem de 350° C, em ambiente ácido (pH = 3,5), ricos em cloreto, ácido sulfídrico e ETR, que ao entrar em contato com a água do mar, com temperatura de aproximadamente 2°C e pH básico em torno de 8, resulta na precipitação imediata de minerais portadores de elementos terras raras.

Outra possibilidade de deposição de minerais de terras raras é associada à interação dos fluidos hidrotermais contendo ETR com a rocha encaixante. Os possíveis efeitos da interação entre os fluidos e a rocha encaixante incluem mudanças de pH ou condições redutoras, além de mudanças na composição das soluções hidrotermais. Uma mudança de pH ácido para neutro ou alterações nas condições de oxidação para redução podem desestabilizar complexos de elementos terras raras ou diminuir a solubilidade de minerais de terras raras. A solubilidade da monazita aumenta com a redução do pH e a precipitação da monazita ocorre em ambientes inicialmente ácidos e que foram neutralizados, permitindo a formação dos cristais do mineral (Ayers & Watson, 1991).

Em relação à cristalização de minerais de ganga, é comum a associação paragenética dos minerais portadores de elementos terras raras, como fluorita e apatita. Tais minerais estão associados à atividade hidrotermal pós-magmática e a presença de apatita e fluorita podem ser explicadas pela redução da atividade dos íons fluoreto (F<sup>-</sup>) e fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) no fluido. De acordo com Jones *et al.* (1996), a redução da concentração dos íons fosfato e fluoreto leva a quebra gradual dos complexos de ETR neutros para ETR<sup>3+</sup>, liberando os íons dos elementos terra rara na solução (equações 2 e 3), permitindo que esse seja incorporado na estrutura cristalina dos minerais de elementos terras raras:



Jones *et al.* (1996), mostrou que, em sistemas hidrotermais, alteração, corrosão, dissolução e transformação são processos passíveis de ocorrer com frequência, uma vez que fluidos de diferentes composições e temperaturas podem circular nos sistemas em vários estágios da história geológica. Trabalhos de Maas *et al.* (1987) mostraram que o processo de percolação de fluidos pode levar a alteração e remobilização de elementos terras raras e acarreta a precipitação de minerais secundários de elementos terras raras em locais distantes da fonte.





## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

#### 4.1 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA DE SEÇÕES DELGADAS POLIDAS

Abaixo é apresentada uma síntese da descrição das seções L1, L2, L3 e L4. As descrições foram realizadas no Laboratório de Microscopia, utilizando os microscópios ópticos OLYMPUS BX41, na função de luz polarizada. Descrições completas se encontram no apêndice I.

Segundo Santos (2017), a matriz das rochas metavulcânicas ácidas da Formação Novo Horizonte, especificamente os metarriolitos, são de composição essencialmente quartzo-feldspática, na qual o quartzo pode ocorrer de duas formas, como porfiroclasto e na matriz da rocha. Pode apresentar também concentrações de minerais opacos, monazita, muscovita, biotita, epidoto, clorita e carbonato. Segundo o mesmo autor, os feldspatos (K-feldspato e plagioclásio) se encontram pouco preservados, com intensa sericitização e carbonatação. O plagioclásio raramente apresenta geminação polissintética. As características petrográficas e geoquímicas permitiram classificar as rochas metavulcânicas ácidas da Formação Novo Horizonte como metarriolitos, uma vez que apresentam registros de metamorfismo de baixo grau, sem obliteração das texturas ígneas.

A descrição macroscópica das seções mostrou que a rocha apresenta granulação fina, coloração cinza claro, marcada por fenocristais em sua maioria incolores.

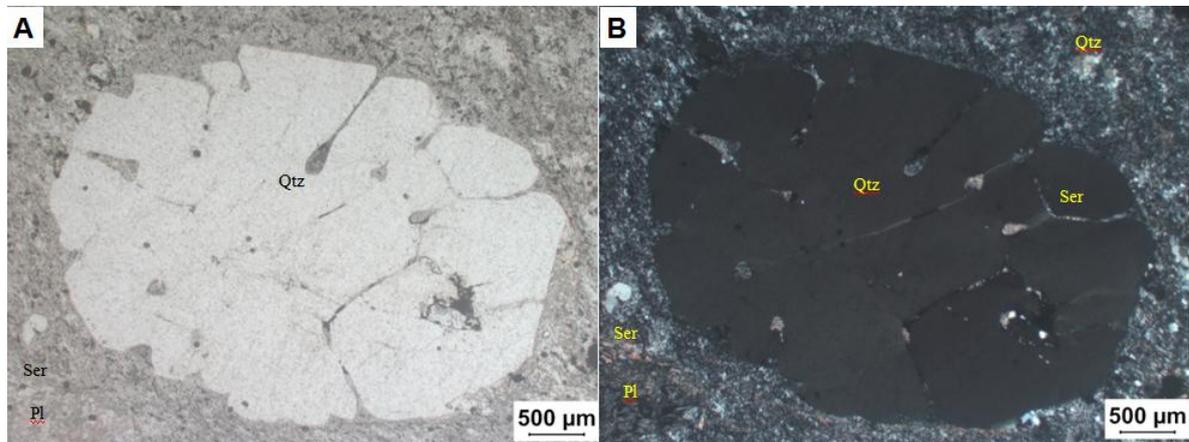
Uma descrição detalhada das amostras L1 à L4 é apresentada a seguir.

##### **Amostra L1 - Metarriolito**

Rocha inequigranular marcada pela presença de uma matriz fina rica em quartzo, feldspato e sericita. Apresenta textura hipocristalina, porfirítica. Dentre os minerais essenciais tem-se aproximadamente 53% de quartzo, incluindo fenocristais e matriz, 24 % de feldspatos distribuídos na forma de matriz e fenocristais, 20% de sericita e os minerais acessórios constituídos por 2 % de opacos e 1 % de apatita.

À LPP o quartzo constitui pequenos grãos em meio a matriz fina e se apresenta como fenocristais predominantemente euédricos a subédricos, alguns com formas cúspides, o que sugere a corrosão do cristal na presença de vidro vulcânico e garante à rocha a textura hipocristalina (Figura 4.1A). Granulação varia de 0,3 a 4,8 mm dispersos em meio a matriz fina, predominantemente quartzo-feldspática. Grãos de feldspato, com granulação variando entre 0,6 mm e 7,1mm apresentam-

se majoritariamente íntegros e pouco alterados e, quando observados a LPP (Figura 4.1A), exibem coloração cinza à acastanhado, de aspecto sujo, o que pode indicar o início do processo de alteração dos grãos por fluidos hidrotermais.

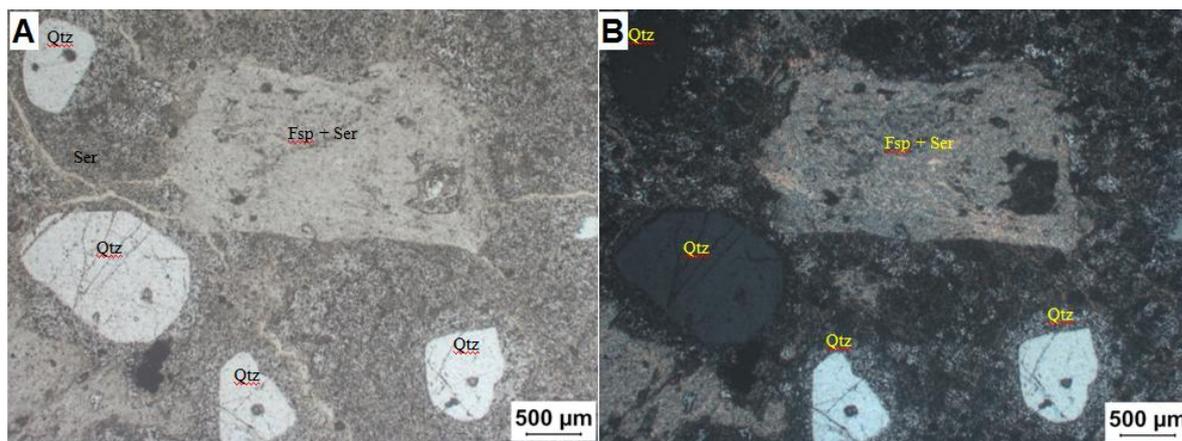


**Figura 4.1-** Fotomicrografia da seção L1. A) Luz polarizada plana (LPP); B) Luz polarizada cruzada (LPC).

À LPC (Figura 4.1B), a maior parte dos grãos de plagioclásio exibem macla polissintética. Nas fraturas, há finas palhetas incolores exibem colorações de segunda ordem, sugerindo a presença de sericita. É possível observar também microcristais de quartzo no entorno dos grãos maiores do mesmo mineral, o que pode ser o resultado da percolação de fluidos hidrotermais na rocha.

### **Amostra L2 - Metarriolito**

Rocha inequigranular marcada pela presença de uma matriz fina rica em quartzo e feldspato. Apresenta textura hipocristalina e porfirítica. Com relação aos minerais essenciais, aproximadamente 51% de quartzo, incluindo fenocristais e matriz, 26 % de sericita e 20 % de feldspatos distribuídos na forma de matriz e fenocristais. Os minerais acessórios constituídos por 2 % de opacos e 1% de apatita. À LPP quartzo se apresenta como fenocristais predominantemente euédricos a subédricos, alguns com formas cúspides, o que sugere a corrosão do cristal na presença de vidro vulcânico (Figura 4.2A) e garante a textura hipocristalina à rocha. Granulação variando de 0,4 a 6,0 mm dispersos em meio a matriz fina. Grãos de feldspato apresentam-se alterados para sericita, ou seja, palhetas finas e incolores. O processo de alteração hidrotermal não obliterou as texturas ígneas.



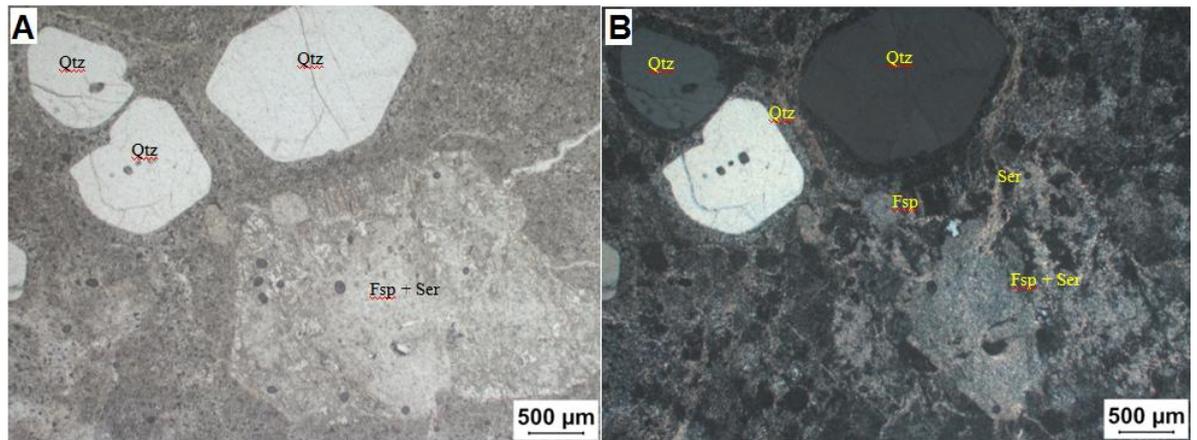
**Figura 4.2** - Fotomicrografia da seção L2. A) Luz polarizada plana (LPP); B) Luz polarizada cruzada (LPC).

À LPC (Figura 4.2B) é possível observar halos no entorno dos cristais de quartzo, sendo esses formados por finos cristais do mesmo mineral, o que sugere uma recristalização do quartzo. Cristais de feldspato se apresentam com cores de interferência de maior ordem. Granulação dos pórfiros variando entre 0,6 mm e 5,2 mm. O elevado grau de alteração impossibilita observar as características ópticas do mineral, o que inviabiliza a identificação minuciosa do feldspato. As palhetas de sericita se apresentam preenchendo as fraturas e presentes na matriz fina da rocha.

### **Amostra L3 - Metarriolito**

Rocha inequigranular marcada pela presença de uma matriz fina composta majoritariamente por quartzo e feldspato. Apresenta textura porfirítica, no qual o quartzo constitui fenocristais subédricos, com granulação variando entre 0,5 mm e 5,7 mm em meio a matriz quartzo-feldspática (fenocristais + matriz = 64 %). À LPP (Figura 4.3B) é possível observar formas cúspides e reentrâncias nas bordas dos grãos, o que indica a ocorrência do processo de devitrificação da rocha, ou seja, a reação do vidro vulcânico com os cristais de quartzo, o que garante à rocha a textura hipocristalina. Feldspatos também se distribuem na forma de fenocristais e matriz (30 %), sendo os fenocristais subédricos à anédricos, com granulação variando de 0,6 mm a 10,8 mm.

É possível observar os grãos intensamente alterados para sericita (5 %) (Figura 4.3B) e, portanto o elevado grau de alteração impossibilita observar as características ópticas do mineral, o que inviabiliza a identificação minuciosa do feldspato. As finas palhetas de sericita aparecem também preenchendo as fraturas bem como na matriz fina da rocha. É possível notar também a presença de halos de quartzo no entorno dos grãos do mesmo mineral, sugerindo um possível processo de recristalização.

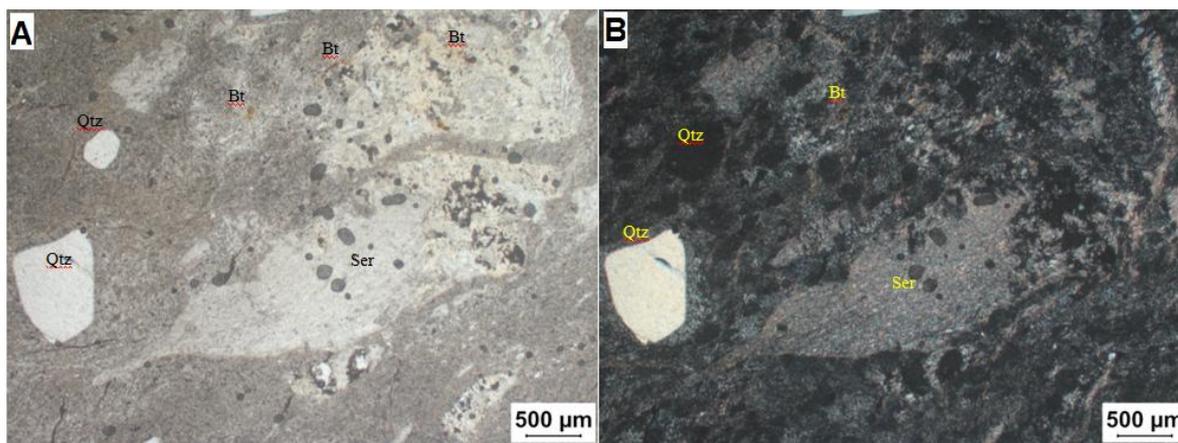


**Figura 4.3** - Fotomicrografia da seção L3. A) Luz polarizada plana (LPP); B) Luz polarizada cruzada (LPC).

#### Amostra L4 - Metarriolito

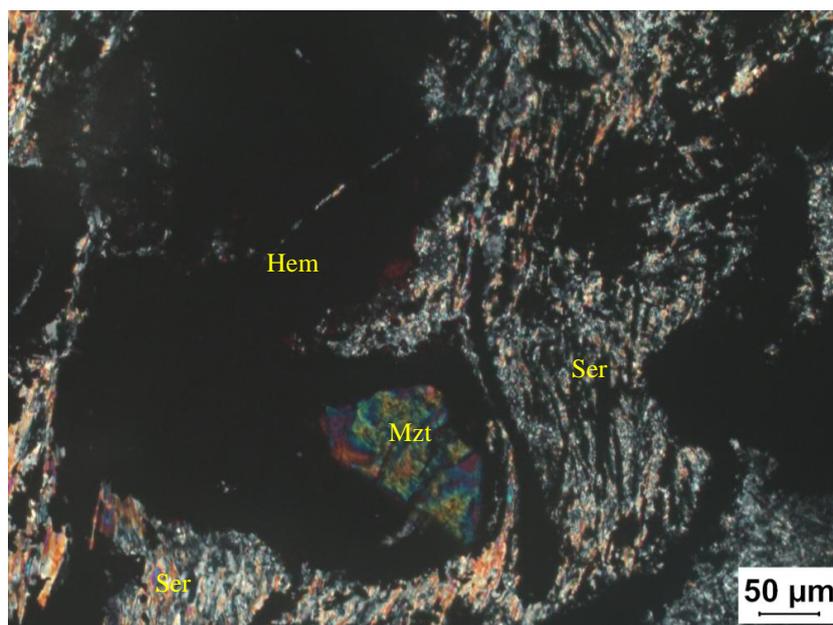
Trata-se de uma rocha inequigranular porfirítica marcada pela alternância entre uma matriz fina rica em quartzo e feldspatos. A LPP apresenta textura hipocristalina, porfirítica (Figura 4.4A), no qual o quartzo constitui fenocristais subédricos em meio a matriz fina (fenocristais + matriz = 50 %), alguns com formas cúspides, o que sugere a corrosão do cristal na presença de vidro vulcânico; granulação variando de 0,4 a 3,5 mm dispersos em meio a matriz fina. Os grãos de feldspato (fenocristais + matriz = 15 %) possuem granulação variando entre 0,2 mm e 5,0 mm, apresentam-se intensamente alterados para sericita, ou seja, palhetas finas incolores quando observadas com nicóis descruzados. Os feldspatos encontram-se alterados para sericita (23 %). Dentre os minerais acessórios têm-se opacos (1 %) e cristais anédricos de elevadas cores de interferência (1 %).

Quando L4 é observada à LPC (Figura 4.4B), é possível observar bandas ou porções localizadas de biotita (10 %), identificadas pela extinção olho-de-pássaro. Finas palhetas incolores dispersas em grande parte da rocha apresentam-se com cores de interferência de maior ordem, sugerindo então a presença de muscovita. Em relação aos feldspatos, o elevado grau de alteração impossibilita observar as características ópticas do mineral e, conseqüentemente, a identificação minuciosa do tipo de feldspato.



**Figura 4.4** - Fotomicrografia da seção L4. A) Luz polarizada plana (LPP); B) Luz polarizada cruzada (LPC).

Ainda em L4, minerais opacos observados com polarizadores cruzados, apresentavam coloração avermelhada, o que sugere a presença de hematita na lâmina. Além disso, pequenos cristais anédricos de tamanhos aproximados de 0,15 mm, com alta cor de interferência, sugerindo um mineral portador de elementos terras raras (Figura 4.5) a ser posteriormente estudado via MEV/EDS.



**Figura 4.5** - Fotomicrografia da seção L4 à luz polarizada cruzada (LPC) evidenciando cristais anédricos de elevadas cores de interferência.

A partir da descrição mineralógica detalhada das quatro lâminas, foi possível estabelecer uma sequência de alteração hidrotermal entre elas, sendo a lâmina L1 a menos alterada e a L4 a mais alterada, a qual apresenta um intenso processo de sericitização o que levou à alteração dos grãos de feldspato, a formação de palhetas de sericita e a possível precipitação de minerais de elementos terras raras.

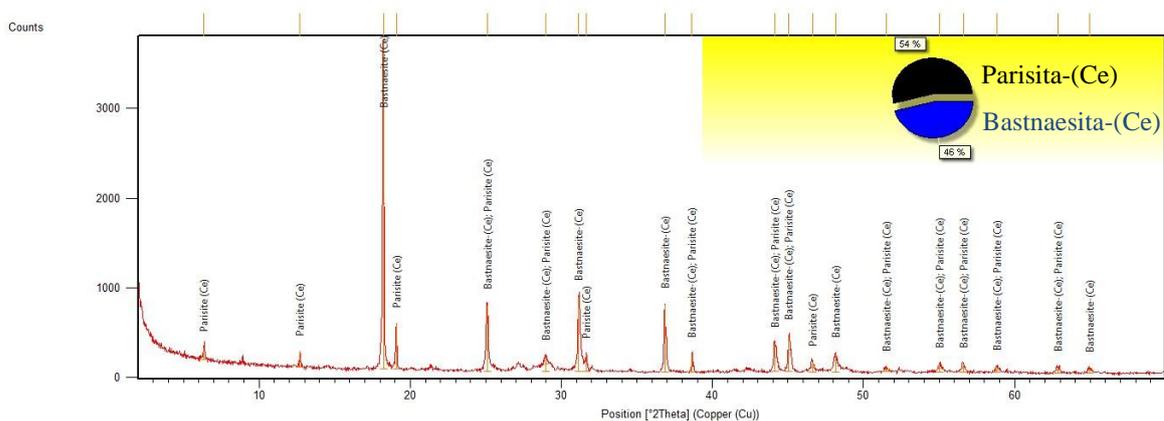
Em L1 foi possível observar a presença de maclas polissintéticas, atestando a presença de plagioclásio pouco alterado pela ação dos fluidos hidrotermais e baixo processo de sericitização. Com relação à L4, a elevada taxa de alteração dos grãos de feldspato, impossibilitou a distinção óptica dos pórfiros. Entretanto, em L4 foram observados pequenos cristais anédricos, em formato de cunha, tamanhos aproximados de 0,15 mm, com cores de interferência de terceira ou até quarta ordem, com formas sub romboédricas a angulosas (Figura 4.9), o que de acordo com os trabalhos de Toledo *et al.* (2004) sugerem a presença de monazita em escala microscópica.

## 4.2 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

### Amostra AMT1

O difratograma (Figura 4.6) mostra um elevado número de contagens e um suave delineamento, o que sugere um baixo nível de ruído e uma boa cristalinidade da amostra.

Após a interpretação do difratograma e com auxílio do banco de dados foi possível identificar duas fases minerais portadores de elementos terras raras. A primeira, assinalada em preto no gráfico de setores, 54 % dos picos identificados e corresponde à Parisita-(Ce), que se trata de um carbonato de cério, cálcio e flúor cujo fórmula química é  $Ce_2CaF_2(CO_3)_3$ . A segunda, representada na cor azul, corresponde a 46 % dos picos identificados e se trata da Bastnaesita-(Ce).



**Figura 4.6:** Difratograma da amostra AMT1 mostrando a identificação dos minerais para os picos demarcados.

### Amostra AMT2

O difratograma (Figura 4.7) mostra um número de contagens relativamente baixo e seu delineamento bastante irregular sugere que a amostra AMT2 tem baixa cristalinidade. Apesar disso, não houve problemas na identificação da fase mineral, na qual banco de dados mostrou que o monocrystal se tratava de Monazita-(Ce), que é um fosfato de cério, cuja fórmula química é  $CePO_4$

O gráfico de setores mostra que 100 % dos picos identificados correspondem à Monazita-(Ce).

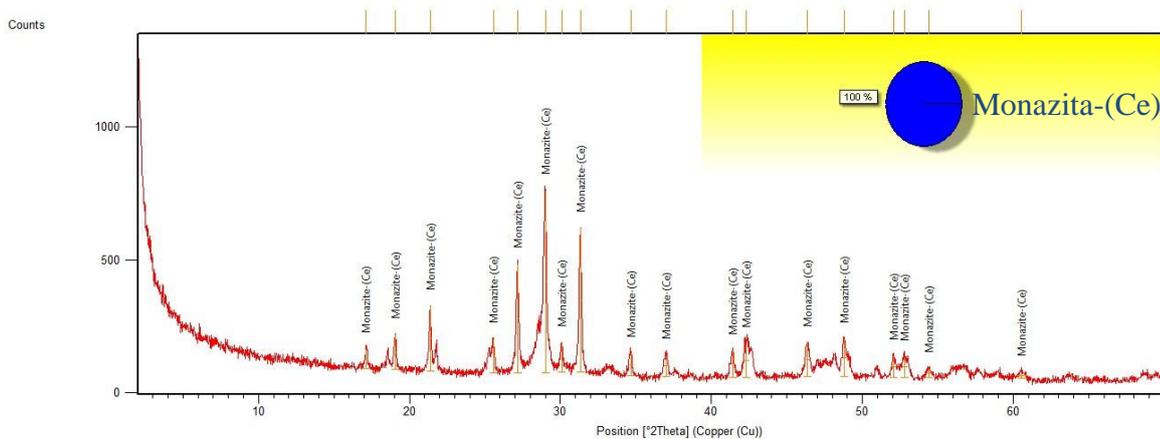
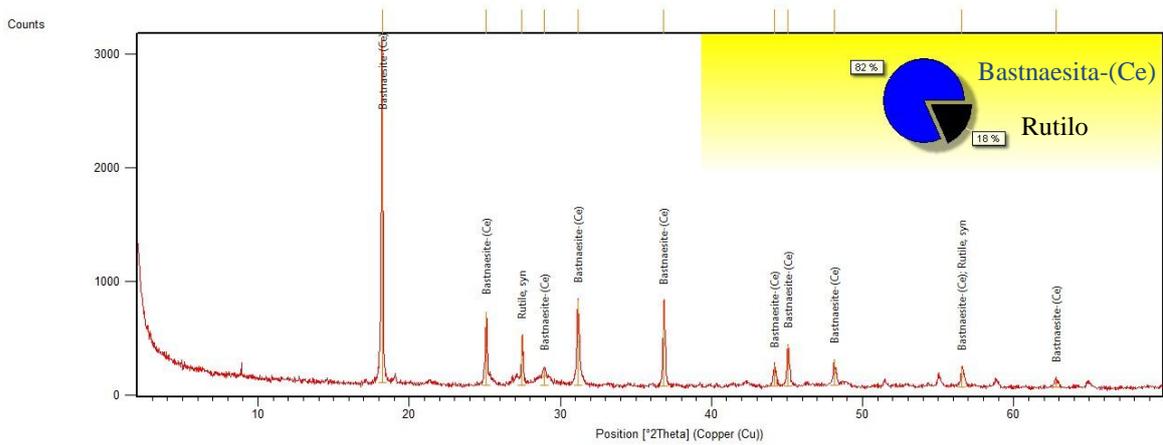


Figura 4.7: Difratograma da amostra AMT2 mostrando a identificação dos picos demarcados.

### Amostra AMT3

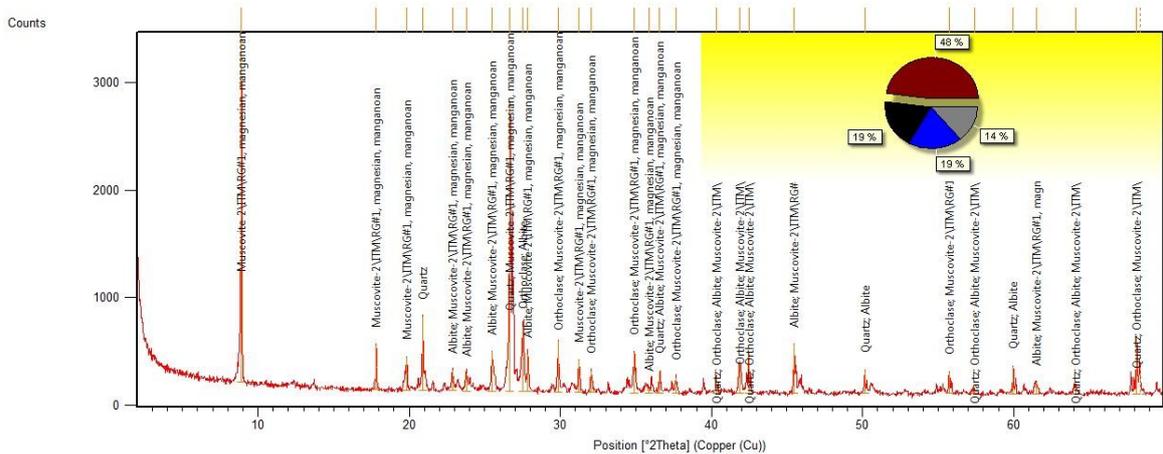
O difratograma (Figura 4.8) mostra um elevado número de contagens e devido ao seu bom delineamento um baixo nível de ruído, o que sugere uma boa cristalinidade da amostra. Após a interpretação da amostra AMT3, foi verificado que trata-se de Bastnaesita-(Ce), um carbonato de cério e flúor (( $CeCO_3$ )F) e rutilo ( $TiO_2$ ), dióxido de titânio. O gráfico de setores mostra que 82 % dos picos identificados correspondem aos picos da Bastnaesita-(Ce) (em azul) e apenas 18 % dos picos do Rutilo (em preto).



**Figura 4.8:** Difratoograma da amostra AMT3 mostrando a identificação dos picos demarcados.

### Amostra AMT4

O difratograma da amostra (Figura 4.9) revelou também com elevado número de contagens e baixo ruído e a identificação de fase mostrou que os principais minerais presentes na amostra são muscovita (cor marrom) com 48% dos picos de identificação, ortoclásio (cor preta) com 19 %, quartzo (cor azul) também com 19 % dos picos e albита com 14 % (cinza).

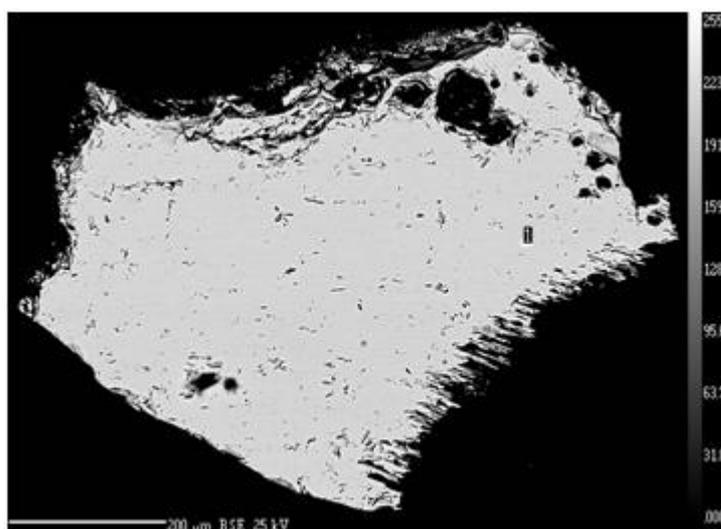


**Figura 4.9:** Difratoograma da amostra AMT4 mostrando a identificação dos minerais para os picos demarcados.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS VIA MICROSSONDA ELETRÔNICA

#### Amostra AMT1

Abaixo na figura 4.10 mostra o ponto onde foi realizada a análise química na amostra AMT1.



**Figura 4.10:** Ponto analisado na amostra AMT1

A análise quantitativa via microsonda eletrônica foi realizada nos ponto 1 e revelou elevada percentagem em peso de CO<sub>2</sub>, F e CaO (Tabela 4.1), o que aponta para carbonatos com elementos terras raras, com presença de cálcio e flúor na composição química. Com relação aos elementos terras raras, tem-se destaque para o lantânio (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), seguido do neodímio (Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Cério (Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e por fim o praseodímio (Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

**Tabela 4.1:** Percentagem em peso dos elementos.

Oxide	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	F	CO <sub>2</sub>	Total
Wt %	0,518058	24,76942	11,16116	4,726094	15,81718	10,09687	7,298526	24,55024	100,25993

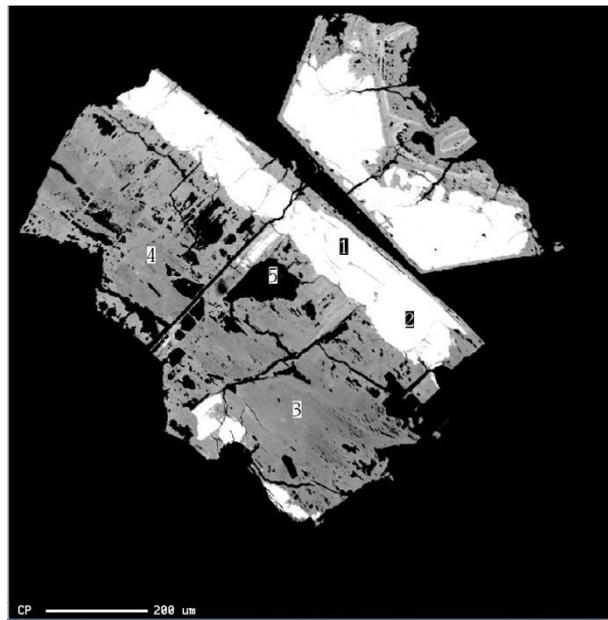
Entretanto parece suspeito a elevada percentagem em peso do elemento químico lantânio e esse não ser o principal elemento terra rara dos minerais identificados. Foi então calculada a fórmula química do mineral no ponto 1 e obtido o seguinte resultado:



Isso mostra que o lantânio, elemento terra rara mais abundante na análise química, encontra-se no mineral Parisita-(La) e não como tinha apontado a Difratomia de Raios X para a Parisita-(Ce), na qual o elemento terra rara predominante é o cério. Foram então revistos os resultados da difração de raios X e se verificou que no banco de dados do *software* X'pert HighScore Plus versão 3.0.0 não consta Parisita de lantânio, apenas de cério, estando, portanto, desatualizado em relação a esse mineral. Visto isso, foi conferido o banco de dados do *software* e atestada a sua completude para os demais minerais de terras raras estudados nesse trabalho, o que garante confiabilidade aos resultados.

### Amostra AMT3

Abaixo na figura 4.11 encontra-se os pontos onde foram realizadas as análises químicas na amostra AMT1.



**Figura 4.11:** Pontos escolhidos na amostra AMT3 para se realizar a análise quantitativa via Microsonda.

A análise de microsonda da amostra supracitada realizada no ponto 1 e mostrou elevado teor de  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ , F e teores relativamente altos de  $\text{La}_2\text{O}_3$  e  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  e muito baixos de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Tabela 4.2). A análise química da amostra permitiu então, se ter a confirmação da Bastnaesita que se trata de um carbonato de Cério e Flúor ( $(\text{CeCO}_3)\text{F}$ ) e, além disso, aponta para elevados teores de três outros elementos de terras raras presentes no mineral: lantânio, neodímio e praseodímio.

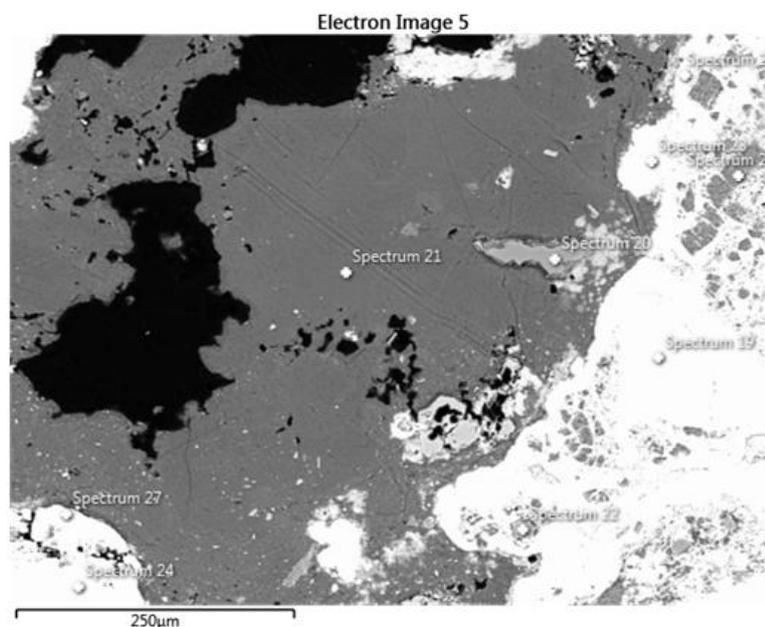
**Tabela 4.2:** Análise quantitativa da amostra AMT3

Oxide	F	CaO	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	Total
Wt %	4,9	0,17	13,22	6,17	37,77	16,51	0,06	21,52	100,32

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DOS MINERAIS DE TERRAS RARAS VIA MEV-EDS

##### Amostra AMT2

A figura 4.12 mostra os pontos analisados na amostra AMT2. A análise semi-quantitativa via MEV/EDS realizada no ponto 19 mostra elevado percentual em peso para cério e fósforo, seguido do lantânio, neodímio e praseodímio (Tabela 4.3). Esses resultados mostram que o mineral investigado se trata da Monazita-(Ce) que é um fosfato de cério, que nesse caso apresenta enriquecimento nos terras raras lantânio, neodímio e praseodímio. Portanto, a análise via MEV/EDS confirmou os resultados da Difractometria de Raios X realizada na amostra AMT2 e revelou ainda o enriquecimento do mineral em três outros elementos terras raras.



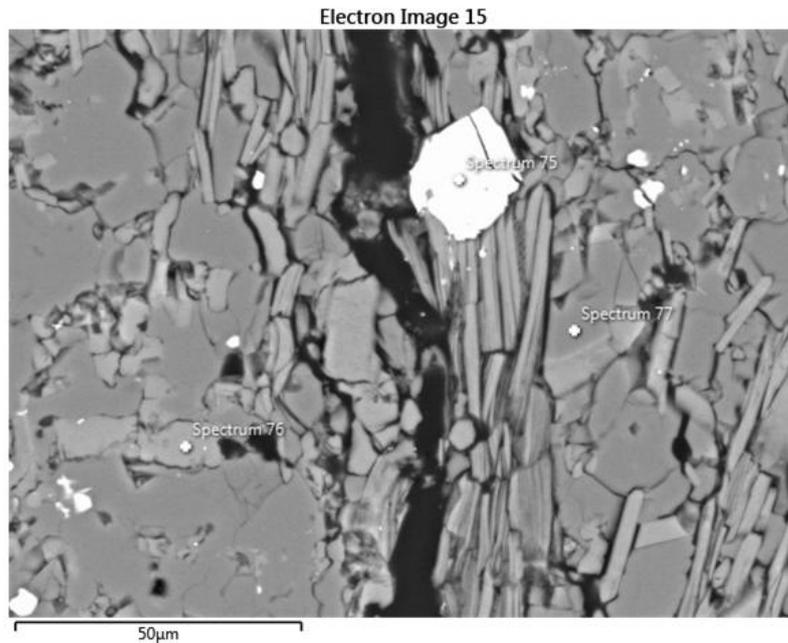
**Figura 4.12:** Pontos analisados na amostra AMT2.

**Tabela 4.3:** Percentagem em peso dos elementos no Ponto 19.

Elemento	Ponto 19
P	26,38
Ca	3,43
La	21,19
Ce	34,46
Pr	2,98
Nd	11,57
Total	100

### Amostra AMT4

A figura 4.13 mostra os pontos analisados na amostra AMT4, onde foram realizadas as análises químicas:

**Figura 4.13:** Pontos analisados na amostra AMT4.

### Ponto 75

A análise semi-quantitativa realizada nesse ponto revelou elevados percentuais em peso para cério e fósforo, seguido do lantânio, neodímio e praseodímio, conforme mostra a tabela 4.4. O elevado percentual em peso para cério e fósforo aponta para um fosfato de cério com enriquecimento em lantânio, neodímio e praseodímio, resultado semelhante ao obtido na amostra ATM2 caracterizada como monazita-(Ce).

### Pontos 76 e 77

As análises semi-quantitativas realizadas nos pontos 76 e 77 (Tabela 4.4) mostram elevados teores de oxigênio e silício, seguidos do potássio, alumínio e ferro em ambas as amostras e baixa quantidade de magnésio no ponto 77.

Os elevados teores de sílica podem estar relacionados à uma possível interferência e reação dos grãos de quartzo, relativamente maiores que os grãos analisados, tornando a análise mais rica em sílica

A ausência de sódio nas análises mostra que ambos os pontos analisados não correspondem à albita e a presença dos demais elementos inviabiliza a possibilidade dos pontos terem sido realizados em cristais de quartzo, restando apenas à possibilidade de serem cristais de ortoclásio ou muscovita. Entretanto, a morfologia dos cristais nos pontos supracitados, que não podem ser caracterizados como palhetas, sugere quem tratam-se de cristais de ortoclásio o que está de acordo com a difratometria de raios X e devido também ao elevado teor de potássio.

Estudos mais aprofundados sobre a detalhada caracterização química desses minerais não serão realizados, pois esse não constitui o objetivo principal desse trabalho.

**Tabela 4.4:** Percentagem dos elementos químicos presentes nos pontos 75, 76 e 77.

Elemento	Ponto 75	Ponto 76	Ponto 77
Mg			0,69
Al		14,72	11,03
Si		73,04	79,24
P	27,48		
K		10,45	6,06
Fe		1,8	2,97
La	22,08		
Ce	30,75		
Pr	3,62		
Nd	16,07		
Total	100	100	100

## DISCUSSÕES

Santos (2017) mostrou que as rochas metavulcânicas ácidas da Formação Novo Horizonte apresentam enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP; o que pode ser comprovado, via MEV-EDS e microsonda eletrônica, nas amostras AMT1, AMT2, AMT3 (monocristais) e AMT4 (fragmento de rocha) do presente trabalho. As dimensões dos cristais de monazita na amostra AMT4 e suas características morfológicas permitem inferir que os cristais tem origem ígnea e não hidrotermal, como é o caso das amostras AMT1, AMT2 e AMT3. Isso sugere a presença de monazita, gerada durante a cristalização do riolito, seja de origem ígnea no protólito do metarriolito, confirmando o enriquecimento da rocha em elementos terras raras leves conforme Santos (2017). Ainda é possível observar nas fotomicrografias fenocristais de quartzo envolvidos por halos de quartzo microcristalino, podendo ser um possível produto da percolação de fluidos hidrotermais nessas rochas.

Visto então o enriquecimento dos metarriolitos da Formação Novo Horizonte nos elementos cério, lantânio, praseodímio e neodímio, parece plausível inferir dois processos mineralizantes. O primeiro deles, a interação entre os fluidos hidrotermais com a rocha encaixante, rica em ETRL, levando a formação minerais primários de ETR, uma vez que os íons  $H^+$  ao reagirem com os feldspatos podem levar ao processo de sericitização da rocha. Isso faz com que ocorra uma mudança de pH ácido para neutro permitindo a formação de cristais de minerais de elementos terras raras como a monazita nas amostra AMT2. O segundo mecanismo possível, mas não menos importante para a cristalização de minerais de ETR, é a partir da alteração hidrotermal de minerais primários de elementos terras raras, sendo comum um equilíbrio químico entre a monazita e a bastnaesita, sendo regido pela variação do pH das soluções bem como pela pressão parcial de  $CO_2$  (Watson & Snyman, 1975). É também comum que tal equilíbrio químico ocorra entre minerais do mesmo grupo, como é o caso da bastnaesita e parisita, que pertencem ao grupo dos fluorcarbonatos. Alterações de pH e pressão parcial do  $CO_2$  podem alterar a atividade dos íons  $Ca^{2+}$  e  $CO_3^{2-}$  presentes nos fluidos hidrotermais, podendo ocorrer a precipitação de parisita a partir da bastnaesita.

Portanto, os minerais portadores de elementos terras raras descritos podem se substituir por meio de reações químicas podem quando há condições específicas de pH e pressão parcial dos gases presentes nos fluidos hidrotermais, em especial o dióxido de carbono. Isso mostra que fluidos hidrotermais mineralizantes são responsáveis pela precipitação de minerais de terras raras de origem primária, entretanto as próprias condições das soluções podem favorecer a formação de minerais de terras raras de origem secundária, gerados pela alteração minerais pré-existentes, de forma a manter o equilíbrio das reações de acordo com as condições do ambiente geológico, o que pode ser a explicação para a ocorrência dos minerais terras raras nos metarriolitos de Novo Horizonte.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

---

A descrição petrográfica das seções delgadas polidas, juntamente com os trabalhos de difratometria de raios X, caracterização mineralógica e química via MEV-EDS e microsonda eletrônica, permitiram identificar e caracterizar três minerais de elementos de terras raras associados às amostras de metarriolitos da Formação Novo Horizonte. Na amostra AMT1 identificou-se uma associação de Parisita-(La) e Bastnaesita-(Ce), na amostra AMT2 e AMT4 o mineral de elementos terras raras identificado foi a Monazita-(Ce) e em relação à amostra AMT3 foi identificada como Bastnaesita-(Ce). É interessante notar o enriquecimento dos minerais analisados em outros elementos terras raras como praseodímio (Pr) e neodímio (Nd).

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que há potencial para a exploração de elementos terras raras, em especial os terras raras leves, associados aos metarriolitos hidrotermalizados da Formação Novo Horizonte, Grupo Rio dos Remédios. É importante salientar que a utilização das técnicas de caracterização mineralógica e química via MEV-EDS e microsonda eletrônica permitiram caracterizar os minerais bem como mensurar os teores de elementos terras raras leves como o lantânio, cério, praseodímio e neodímio, elementos do grupo dos terras raras leves (ETRL) presentes nos minerais identificados. Em suma, a utilização conjunta das técnicas se mostraram efetivas no trabalho de caracterização de minerais terras raras presentes nos metarriolitos da região de Novo Horizonte, Bahia e podem vir a contribuir para futuros trabalhos, sejam acadêmicos ou mesmo trabalhos de exploração e aproveitamento do recurso mineral.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Ayers, J.C., Watson, E.B. 1991. Solubility of apatite, monazite, zircon, and rutile in supercritical aqueous fluids with implications for subduction zone geochemistry. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **335**:365-375.
- Barbosa, J.S.F. 2012. Geologia da Bahia: pesquisa e atualização, 2v.: il. color. – (Série de publicações especiais; 13). Salvador, CBPM, 33-85 p.
- Chaves, M.L.S.C., Menezes-Filho, L.A.D. M. 2017. Minerais do grupo da crichtonita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço (Minas Gerais e Bahia). *Revista do Instituto de Geociências – USP*, **17**:31-40.
- Chaves, M.L.S.C., Buhn, B., Heinis Dias, C., Menezes-Filho, L.A.D. M. 2018. Idades U-Pb em xenotímio-(Y) de um veio de quartzo com almeidaíta e parisita-(La), novos minerais encontrados na Serra do Espinhaço (Novo Horizonte, Bahia). *Geociências – São Paulo, UNESP*, **37**:225 – 236.
- Dominguez, J.M.L. 1993. As coberturas do Cráton São Francisco: uma abordagem do ponto de vista da análise de bacias. In: Dominguez, J.M.L. & Misi A. (eds), O Cráton São Francisco. *Reunião preparatória do II Simp. Cráton São Francisco*. Salvador, SBG/Núcleo Ba-SE/SGM/CNPq, p. 137-159.
- Guimarães, J.T., Martins, A.A.M., Filho, Loureiro, H.S.C., Arcanjo, J.B.A., Neves, J.P, Abram, M.B., Silva, M.G., Melo, R.C. & Bento, R.V. 2005. Projeto Ibitiara-Rio de Contas. 148p.
- Horta, L.F.C, Oliveira A.E.A, Chaves, M.L.S.C, Menezes Filho, L.A.D, Scholz, R. 2016. Caracterização dos Minerais Terras Raras em Veios Hidrotermais dos Riolitos do Grupo Rio Dos Remédios, Novo Horizonte, Bahia. *XIV Congresso de geoquímica dos países de língua portuguesa*.
- Jones, A.P., Wall, F. & Williams, T. (eds). 1996. *Rare Earth Minerals. Chemistry, origin and ore deposits*. Chapman & Hall, London, UK, 357p.
- Maas, R., McCulloch, M. T., Campbell, I. H. and Page, R. W. (1987) Sm-Nd isotope systematics in uranium-rare earth element mineralization at Kathleen Uranium Mine, *Queensland.Econ. Geol.*,**82**:1805–1826.
- Mackenzie, W.S., Donaldson, C.H. and Guilford, C. First published 1982. *Atlas of igneous rocks and their textures*. 148p.
- Mariano, A.N. (1989) Cathodoluminescence emission spectra of rare earth element activators in minerals, in *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements* (eds B. R. Lipin and G. A. McKay), Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, **21**:339-348.
- Melfi, A.J., Misi, A., Campos, D.A & Cordani, A.G. 2016. *Recursos Minerais no Brasil. Problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 406 p.
- Menezes-Filho, L.A.D., Chaves, M.L.S.C, Chukanov, N.V, Atencio, D, Scholz, R, Pekov, I, Costa, G.M, Morrison, S.M, Andrade, M.B, Freitas, E.T.F, Downs, R.T and Belakovskiy. 2018. Parisite-(La), idelly  $\text{CaLa}_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$ , new mineral from Novo Horizonte, Bahia, Brazil. Research Article. *Mineralogical Magazine* (2018) **82** (1): 133-144.
- Pedreira; A. J.; Margalho, R. S. F. X. M. (Org.) Mucugê: folha SD.24-V-C-II: Estado da Bahia. Texto explicativo. Salvador: CPRM, 1989. 112 p. il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB.
- Rosental, S. Terras-raras. Rio de Janeiro: CETEM, dez. 2008.(Comunicação Técnica: CT2008-188-00).
- Santos, J.M.A. 2017. *Geologia, Petrografia e Geoquímica das Rochas Metavulcânicas Ácidas da Estrada Real, Rio de Contas (BA)*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 85 p.
- Schobbenhaus, C., Hoppe, A., Baumann, A., Lork, A. 1994. Idade U/Pb do vulcanismo Rio dos Remédios, Chapada Diamantina, Bahia. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 38, 1994, Balneário Camboriú. Boletim de Resumos Expandidos, Camboriú, **2**:397-398.
- Schobbenhaus, C.; Kaul, P.F.T. 1971. *Contribuição à estratigrafia da Chapada Diamantina, Bahia Central*. Mineração e Metalurgia, v. 53, p. 116-120.

Arcanjo, D.J.S. 2018, Caracterização dos Minerais de Terras Raras de Novo Horizonte, Bahia

Silva, A.J.C.L.P. 1994. *O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina no Centro-Oriental, Bahia: sedimentologia, estratigrafia e tectônica*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Siqueira, L.P., 1978. A Evolução Geológica do Precambriano no Estado da Bahia e as mineralizações. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 30, Recife, 1978. *Anais*. Recife, Soc. Bras. Geol. v.6, p. 2478-2492.

Teixeira, L. R. 2005. Projeto Ibitiara- Rio de Contas: relatório temático de litogeoquímica. Salvador: CPRM, 33 p. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Relatório interno.

Toledo, M.C.M, Oliveira, S.M.B., Fortan, F, Ferrari, V.C., Parseval, P. 2004. Mineralogia, Morfologia e Cristaloquímica da Monazita de Catalão I (GO, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*. **34**(1):135-146.

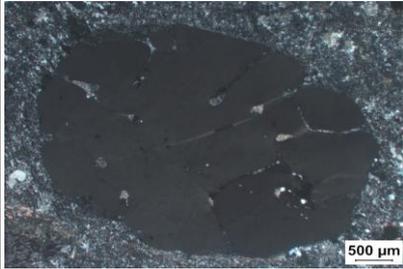
USGS – UNITED STATES GEOLICAL SURVEY. Minerals Yearbook, vol. 1, 2007.

Watson, C.P, Snyman, M.D. 1975. The geology and the mineralogy of the fluorite deposits at the Buffalo Fluor-spar Mine on Buffelsfontein, 347KR Naboomspruit District. *South African Journal of Geology*, 78, Issue 1,1975, p. 137 – 151.

Williams-Jones, A.E, Wood, S.A. 1992. A preliminary petrogenetic grid for REE fluorocarbonates and associated minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, Issue 2, p. 725-738.

[www.ferias.tur.br/fotogr/40568/mapadelocalizacao/novohorizonte](http://www.ferias.tur.br/fotogr/40568/mapadelocalizacao/novohorizonte)

# Apêndice(I)

		<b>FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA -TCC</b>	
		Caracterização dos minerais de terras raras de Novo Horizonte, Bahia.	
		Orientador: Edison Tazava	
<b>Lâmina: L1</b>			
<b>Descrição: Deilson José da Silva Arcanjo</b>			
<b>Descrição Macroscópica da Lâmina</b>			
Rocha inequigranular porfirítica com fenocristais em meio a uma matriz fina			
<b>Descrição Microscópica</b>			
<b><u>Minerais Identificados (ordem decrescente de abundância)</u></b>			
<b>Minerais Essenciais:</b>		Quartzo (Fenoc + Mat = 53%); Feldspato (24%); Sericita (20%)	
<b>Minerais Acessórios:</b>		Opcos (02%), Apatita (01%)	
<b>Processos de Alteração:</b>		Sericitização	
<b>Descrição Microscópica da Lâmina</b>		<b>Fotomicrografias</b>	
<p>Rocha inequigranular marcada pela presença de uma matriz fina rica em quartzo, feldspato e sericita. Apresenta textura hipocristalina, porfirítica. Quartzo constitui pequenos grãos em meio a matriz fina e se apresenta como pórfiros predominantemente euédricos a subédricos, alguns com formas cúspides, o que ressalta a corrosão do cristal na presença de vidro vulcânico. Granulação variando de 0,3 a 4,8 mm dispersos em meio a matriz fina, predominantemente quartzo-feldspática. Grãos de feldspato, com granulação variando entre 0,6mm e 7,1 mm apresentam-se majoritariamente íntegros e pouco alterados, quando a nicóis descruzados exibem coloração cinza a acastanhado, de aspecto sujo, o que pode indicar o início do processo de alteração dos grãos. Quando a nicóis cruzados a maior parte dos pórfiros exibe macla Carlsbad o que indica a presença de k-feldspato. Nas fraturas, presença de finas palhetas, incolores a nicóis descruzados e a nicóis cruzados exibem colorações de segunda ordem, sugerindo a presença de uma mica. Outros grãos que apresentam o mesmo aspecto sujo descrito acima, a nicóis cruzados exibem a macla polissintética, o que mostra a presença de plagioclasio na amostra de rocha.</p>			
			
		<b>Polarização: a) nicóis paralelos e b) nicóis cruzados</b>	
<b>Nome da Rocha:</b>		Metarrilolito	



## FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA -TCC

Caracterização dos minerais de terras raras de Novo Horizonte, Bahia.

Orientador: Edison Tazava

Lâmina: L2

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC 402

Descrição: Deilson José da Silva Arcanjo

### Descrição Macroscópica da Lâmina

Rocha inequigranular porfírica de granulação fina, coloração cinza clara, marcada por fenocristais em sua maioria incolores.

### Descrição Microscópica

#### Minerais Identificados (ordem decrescente de abundância)

**Minerais Essenciais:** Quartzo (Fenoc + Mat = 51%); Sericita (26%); Feldspatos ( Fenoc + Mat = 20%)

**Minerais Acessórios:** Opacos (02%); apatita (01%)

**Processos de Alteração:** sericitização

#### Descrição Microscópica da Lâmina

Rocha inequigranular marcada pela presença de uma matriz fina rica em quartzo e feldspato. Apresenta textura hipocristalina, porfírica. Quartzo constitui pequenos grãos em meio a matriz fina e se apresenta como fenocristais predominantemente euédricos a subédricos, alguns com formas cúspides, o que ressalta a corrosão do cristal na presença de vidro vulcânico. Granulação variando de 0,4 a 6,0 mm dispersos em meio a matriz fina. Grãos de feldspato apresentam-se alterados para sericita, ou seja, palhetas finas e com cores de maior ordem quando observadas com nicóis cruzados e incolores quando observados com nicóis descruzados. Granulação dos pórfiros variando entre 0,6 mm e 5,2 mm. O elevado grau de alteração impossibilita observar as características ópticas do mineral, o que inviabiliza a identificação minuciosa do feldspato. As finas palhetas de mica se apresentam também preenchendo as fraturas bem como sua presença na matriz fina da rocha. Os grãos de quartzo apresentam feições de sub-grãos nas bordas.

#### Fotomicrografias



Polarização: a) nicóis paralelos e b) nicóis cruzados

Nome da Rocha:

Metarriolito



## FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA -TCC

Caracterização dos minerais de terras raras de Novo Horizonte, Bahia.

Orientador: Edison Tazava

Lâmina: L3

Descrição: Deilson José da Silva Arcanjo

### Descrição Macroscópica da Lâmina

Rocha inequigranular porfírica, de granulação fina, coloração cinza clara, marcada por fenocristais em sua maioria incolores distribuídos em meio a uma matriz fina.

### Descrição Microscópica

#### Minerais Identificados (ordem decrescente de abundância)

**Minerais Essenciais:** Quartzo (Fenoc + Mat = 64%); Feldspatos ( Fenoc + Mat = 30%); Sericita (05%);

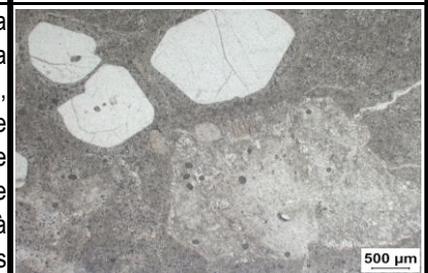
**Minerais Acessórios:** Opacos (01%)

**Processos de Alteração:** Sericitização

#### Descrição Microscópica da Lâmina

Rocha inequigranular marcada pela presença de uma matriz fina composta majoritariamente por quartzo e feldspato. Apresenta textura porfírica, marcada pela presença de pórfiros de quartzo, predominantemente euédricos à subédricos, com granulação variando entre 0,5 mm e 5,7 mm. Apresentam formas cúspides e reentrâncias nas bordas dos grãos, o que indica a ocorrência do processo de devitrificação da rocha, ou seja, a reação do vidro vulcânico com os cristais de quartzo, o que garante à rocha a textura hipocristalina. Pórfiros subédricos à anédricos de feldspato, com granulação variando de 0,6 mm a 10,8 mm . Os grãos se apresentam intensamente alterados para sericita e portanto o elevado grau de alteração impossibilita observar as características ópticas do mineral, o que inviabiliza a identificação minuciosa do feldspato. As finas palhetas de sericita aparecem também preenchendo as fraturas bem como na matriz fina da rocha. Os grãos de quartzo apresentam feições de sub-grãos nas bordas.

#### Fotomicrografias



Polarização: a) nicóis paralelos e b) nicóis cruzados

Nome da Rocha:

Metarriolito



## FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA -TCC

Caracterização dos minerais de terras raras de Novo Horizonte, Bahia.

Orientador: Edison Tazava

Lâmina: L4

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC 402

Descrição: Deilson José da Silva Arcaño

### Descrição Macroscópica da Lâmina

Rocha inequigranular porfírica, de granulação fina, coloração cinza clara, marcada por fenocristais em sua maioria incolores e alguns de coloração marrom, o que sugere a presença de biotita.

### Descrição Microscópica

#### Minerais Identificados (ordem decrescente de abundância)

Minerais Essenciais:

Quartzo (Fenoc + Mat = 50%); Sericita (25%); Feldspatos ( Fenoc + Mat = 15%); Biotita (07%);

Minerais Acessórios:

Opacos (02%); Minerais de ETR's (01%), apatita

Processos de Alteração:

Sericitização

### Descrição Microscópica da Lâmina

Rocha inequigranular marcada pela alternância entre uma matriz fina rica em quartzo e feldspatos além de bandas ou porções localizadas de biotita. Os feldspatos encontram-se altamente sericitizados. Apresenta textura hipocristalina, porfírica. Quartzo constitui pequenos grãos em meio a matriz fina e se apresenta como fenocristais subédricos, alguns com formas cúspides, o que ressalta a corrosão do cristal na presença de vidro vulcânico, granulação variando de 0,4 a 3,5 mm dispersos em meio a matriz fina. Os grãos de quartzo apresentam feições de sub-grãos nas bordas. Grãos de feldspato com granulação variando entre 0,2 mm e 5,0 mm, apresentam-se intensamente alterados para sericita, ou seja, palhetas finas e com cores de maior ordem quando observadas com nicóis cruzados e incolores quando observadas com nicóis des cruzados, tratando-se portanto de finos grãos que sugerem a presença de mica branca (de muscovita?), sendo que essa também se apresenta em grandes proporções na matriz. O elevado grau de alteração impossibilita observar as características ópticas do mineral, o que inviabiliza a identificação minuciosa do feldspato. Pequenos cristais anédricos de tamanhos aproximados de 0,15 mm, com cores de interferência de terceira ou até quarta ordem foram observados, sugerindo um mineral de terras raras. Esses serão melhor estudados por análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (MEV/FDS).

### Fotomicrografias



Polarização: a) nicóis paralelos e b) nicóis cruzados

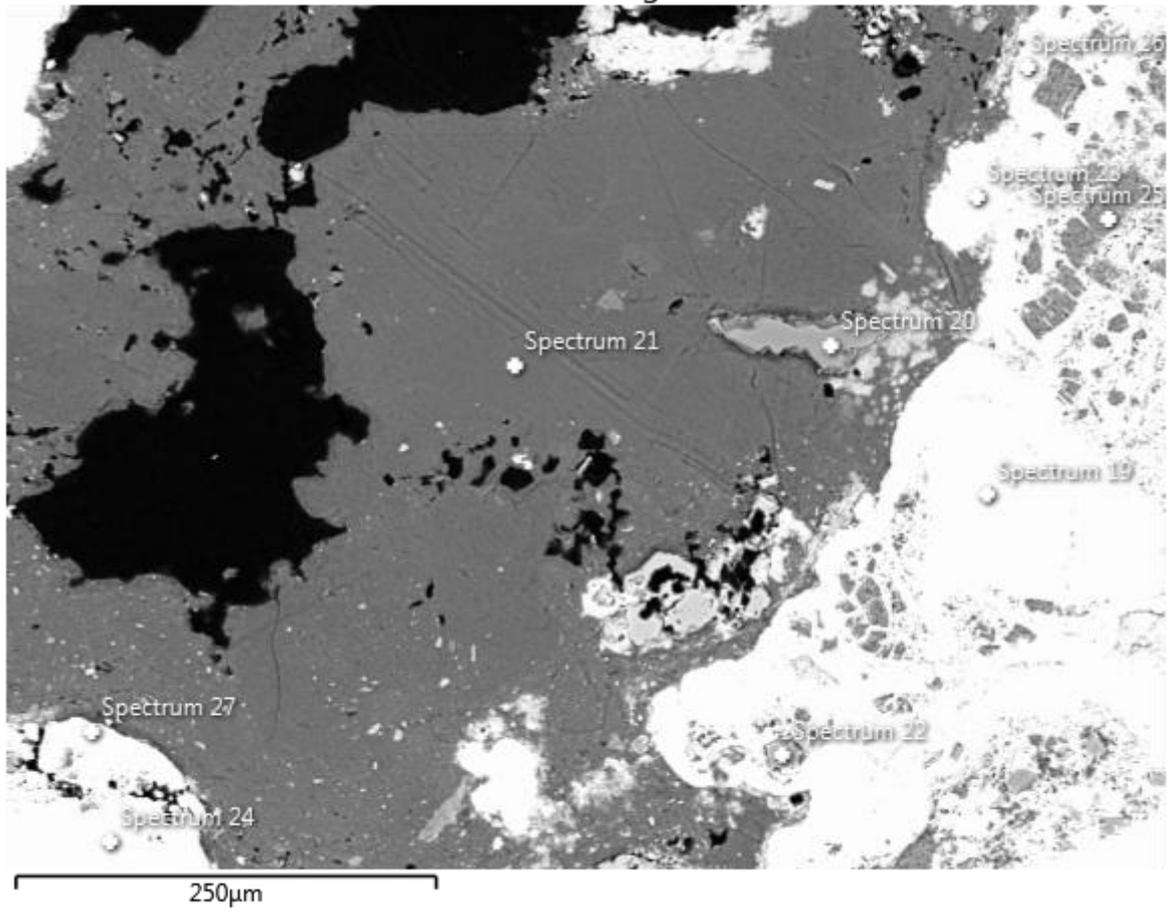
Nome da Rocha:

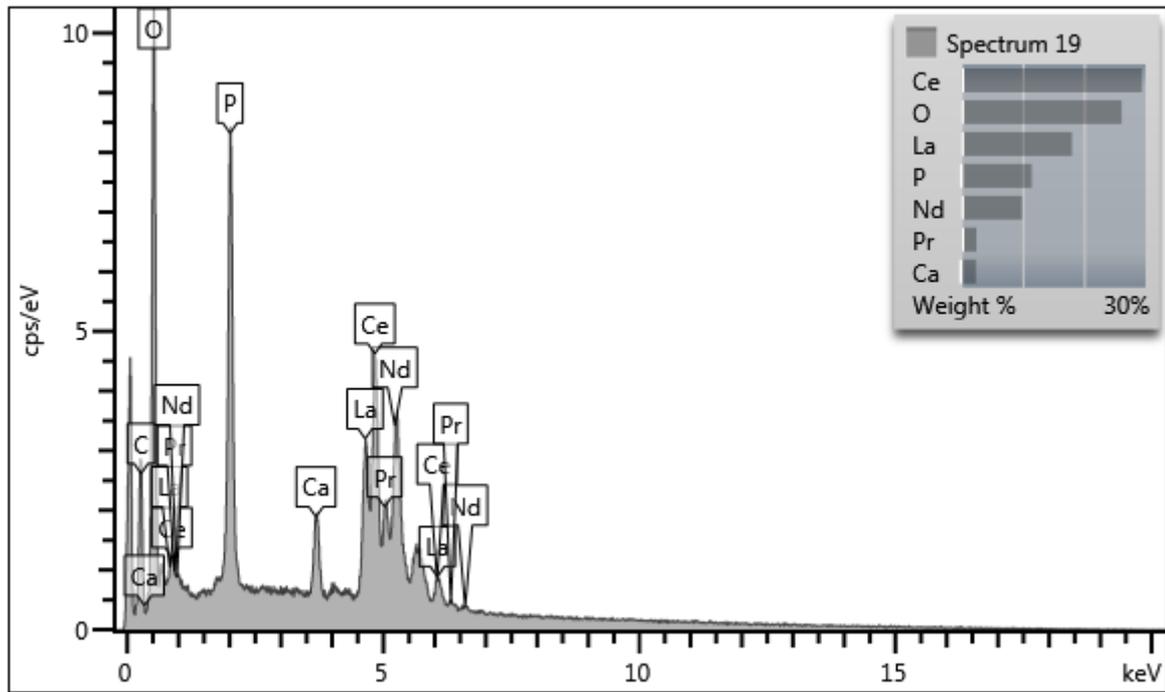
Metarriolito

## Apêndice(II)

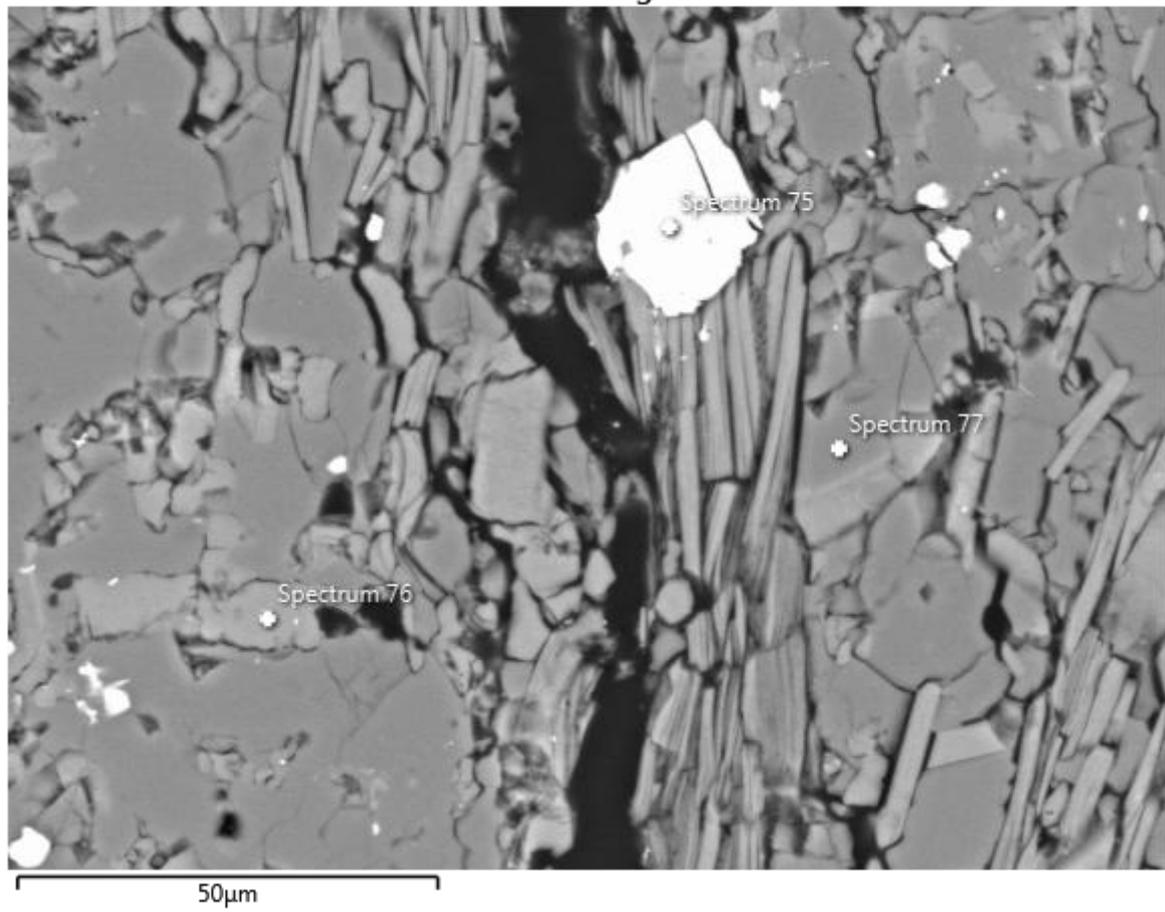
---

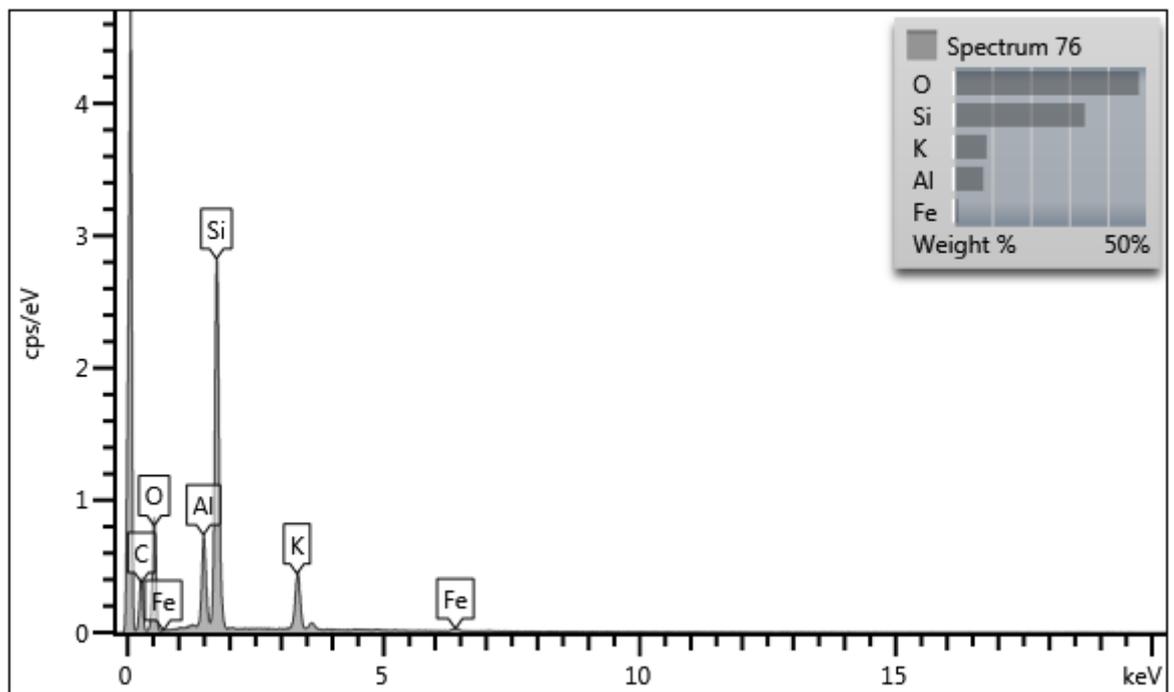
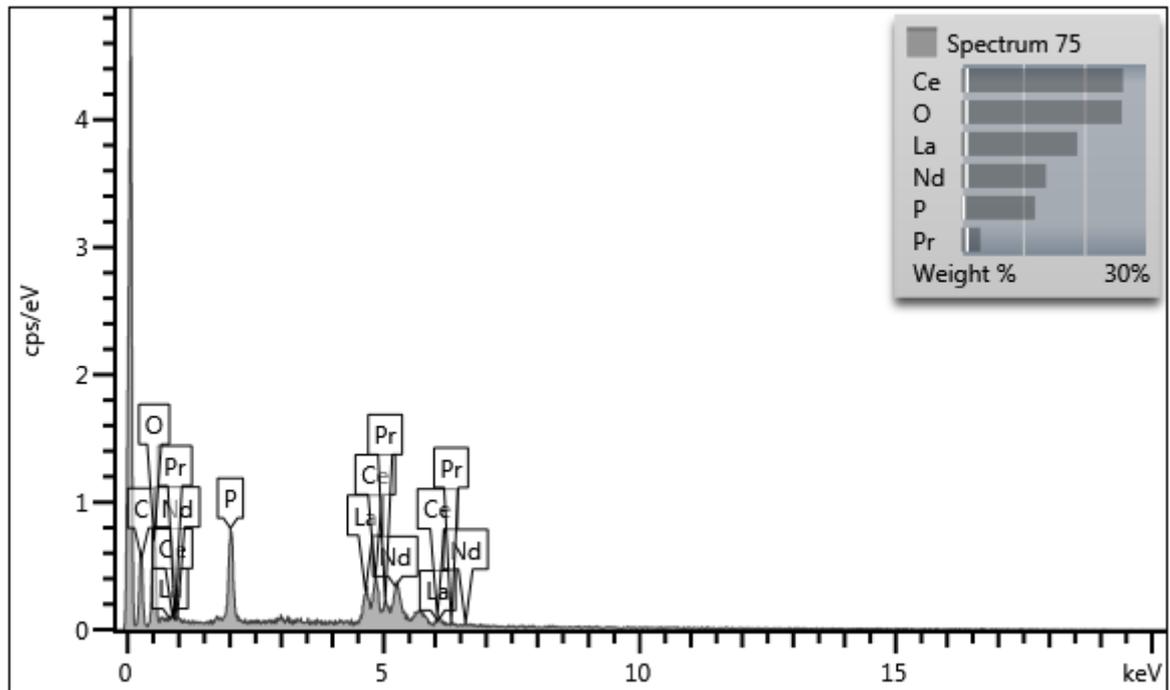
Electron Image 5

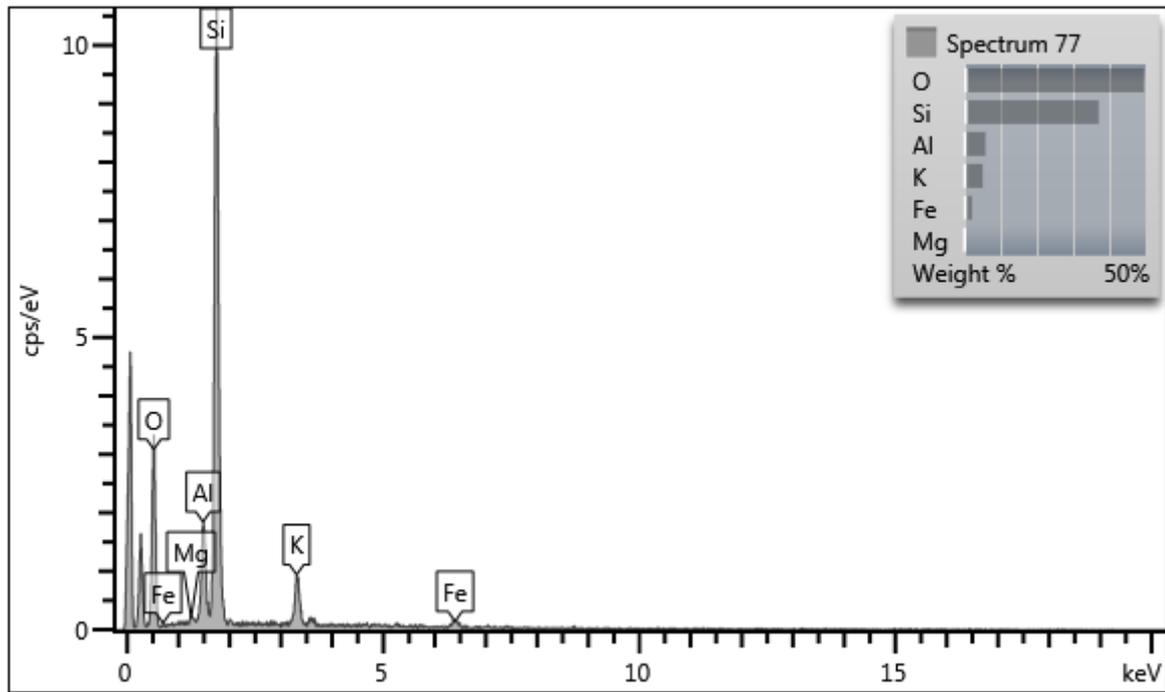




Electron Image 15









MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS – DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

## DECLARAÇÃO

---

Declaro que o aluno **DEILSON JOSÉ DA SILVA ARCANJO**, autor do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “Caracterização dos Minerais de Terras Raras de Novo Horizonte, Bahia”, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 19 de dezembro de 2018.

Prof. MSc. Edison Tazava.  
Orientador