

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
BACHARELADO EM GEOLOGIA

Tiago Saldanha de Lima

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E APLICAÇÃO DE  
TERMOBAROMETRIA NOS CLINOPIROXÊNIOS DA SUÍTE  
ALCALINA PASSO DA CAPELA - RS**

Porto Alegre - 2023

Tiago Saldanha de Lima

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E APLICAÇÃO DE  
TERMOBAROMETRIA NOS CLINOPIROXÊNIOS DA SUÍTE  
ALCALINA PASSO DA CAPELA - RS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof. Dra. Márcia Elisa Boscato Gomes

Supervisor: Maurício Dias da Silva

Porto Alegre – 2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Lima, Tiago  
CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E APLICAÇÃO DE  
TERMOBAROMETRIA NOS CLINOPIROXÊNIOS DA SUÍTE ALCALINA  
PASSO DA CAPELA - RS / Tiago Lima. -- 2023.  
96 f.  
Orientadora: Márcia Elisa Boscato Gomes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,  
BR-RS, 2023.

1. Fonolitos. 2. Petrologia Ígnea. 3. Magmatismo  
Alcalino. 4. Microsonda Eletrônica. 5.  
Termobarometria. I. Boscato Gomes, Márcia Elisa,  
orient. II. Título.

Tiago Saldanha de Lima

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E APLICAÇÃO DE  
TERMOBAROMETRIA NOS CLINOPIROXÊNIOS DA SUÍTE  
ALCALINA PASSO DA CAPELA - RS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Geologia.

Porto Alegre, 17 de março de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira  
Universidade UFRGS

---

Msc. Susan Drago  
Universidade UFRGS

---

Msc. Dionatan Ferri Padilha  
Universidade UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais Evandro e Dejanira por compartilharem esse mesmo sonho comigo ao longo desta trajetória. Dedico também aos meus irmãos Pedro, Natália e Mariana por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões.

## AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a minha família, sem ela nada disso poderia estar se tornando realidade. Obrigado pai por todas as inúmeras e incontáveis discussões geológicas ao longo destes anos, sei que minha teimosia foi o catalisador para diversas delas, e por isso agradeço o amor e a paciência. Agradeço também a minha mãe que ao longo de toda minha vida sempre foi o maior exemplo de amor e carinho que presenciei, obrigado mãe por sempre confiar em mim e acreditar em minhas escolhas. Agradeço muito aos meus irmãos que ao longo da minha vida me deram o apoio a todas minhas decisões e sempre foram extremamente carinhosos comigo apesar de nossa diferença de idade – aqui abro um agradecimento especial ao meu irmão Pedro e minha cunhada Monique que sempre escutaram minhas reclamações e sempre foram para mim além de família bons amigos conselheiros. Gostaria também de agradecer minha vó Lia que ao longo da vida sempre foi a maior imagem de uma pessoa batalhadora e pé no chão, obrigado vó sem ti não seria a pessoa que sou.

Por parte de meus amigos começo agradecendo os mais antigos, aqueles com os quais eu cresci e pude ter a oportunidade de vê-los crescer, obrigado Rafinha, Lucas, Pimenta, Younes, Dedé, Gustavo, Pet e Erick – passar a maior parte da minha vida com vocês ao meu lado com toda certeza foi decisivo para eu ser a pessoa que me encontro hoje. Gostaria depois de lembrar dos meus amigos Bernardo, Thiago, Lua, Cesco, Carol e Pedro, este último especial pela convivência no apartamento 508 na Dezessete de Julho, com toda certeza esses dois últimos anos serão inesquecíveis. E por fim, agradeço aos meus amigos da faculdade, muitos destes que se formam comigo e outros que ainda ficam e com certeza serão ótimos profissionais – obrigado Ju, Mari, Link, Thiagão, Gabi, Vitinho e outros – vocês fizeram toda diferença para esses últimos anos terem sido os melhores possíveis.

Gostaria de agradecer também pela orientação e amizade durante mais de 4 anos da professora doutora Márcia Boscato, obrigado professora pela confiança e pela orientação em todos esses anos, tenho certeza que tu mudaste o meu caminho profissional e vou levar com muito carinho estes anos de aprendizado. Obrigado Maurício – meu colega/amigo/chefe/orientador de bolsa sem tuas ajudas, correções e debates este trabalho com toda certeza não seria possível. Agradeço também toda

equipe do laboratório de microsonda eletrônica da UFRGS, principalmente a Susan que sempre se disponibilizou a me ajudar na geração de todos os dados durante todos esses anos de graduação.

Agradeço a professora Amandinha por sempre estar no café para ouvir nossas reclamações e por ter me orientado em meu estágio obrigatório – obrigado Amandinha – e finalizo agradecendo todos os professores do mapeamento geológico 1 e 2 por esse final de curso, onde aprendi e pus em prática todo conhecimento adquirido ao longo do curso – obrigado professores Sommer, Edinei, Carla, Éverton (obrigado pela orientação na bolsa também professor), Fátima, Jairo, Dani e nosso eterno motorista Jarson por todas as risadas ao longo do percurso São Gabriel – Faixa V.

Nunca imites ninguém. Que a tua produção seja como um novo fenômeno da Natureza.

Leonardo da Vinci



## RESUMO

A última manifestação de magmatismo datada no Escudo Sul-rio-grandense possui afinidade alcalina predominantemente subsaturada em SiO<sub>2</sub> composta por um conjunto de pelo menos 34 corpos hipabissais descritos como *necks* e diques e denominado como Suíte Alcalina do Passo da Capela. Essa manifestação magmática encontra-se próxima a cidade de Piratini (RS) e está comumente associada com grandes lineamentos de orientação NW e foi datada por trabalhos anteriores com idades entre 99.6 -76 Ma com composições variando de basaníticas a fonolíticas. As composições evoluídas foram ainda separadas em dois grupos. Os Fonólitos porfiríticos – ricos em melanita, noseana/hauyina, sanidina, clinopiroxênio, titanita, apatita - e os tipos subafíricos, um pouco mais diferenciados, constituídos por sanidina, noseana-hauyina e baixa percentagem de clinopiroxênio. O projeto tem como objetivo investigar a termometria e cristalização fracionada a partir da geoquímica de rocha total e caracterização mineralógica. Inicialmente realizou-se um estudo bibliográfico pré-campo da área e de temas sobre a aplicação dos métodos geoquímicos para definir-se *trends* e modelos para sistemas alcalinos. Em seguida foram realizados trabalhos de campo onde foram coletadas amostras dos três diferentes tipos petrográficos com intuito de serem feitas lâminas petrográficas e estudo de química mineral em microsonda eletrônica em toda assembleia mineralógica. Além disso foram compilados dados de geoquímica de rocha total e em conjunto com os dados de química mineral foram aplicados em métodos de termobarometria para estudos de petrogênese da SAPC. A partir, então, dos dados termobarométricos foram definidas diferentes condições de cristalização para cada tipo petrográfico sugerindo uma história mais complexa do que as propostas anteriores de uma evolução puramente por cristalização fracionada.

Palavras-Chave: Fonólitos, Petrologia Ígnea, Magmatismo Alcalino, Geoquímica, Microsonda Eletrônica, Termobarometria.

## ABSTRACT

The last dated manifestation of magmatism in the Sul-rio-grandense Shield has an alkaline affinity dominantly undersaturated in SiO<sub>2</sub> composed of a set of at least 34 hypabyssal bodies described as necks and dykes and named as the Passo da Capela Alkaline Suite. This magmatic manifestation is found near the city of Piratini (RS) and is commonly associated with large NW-oriented lineaments and was dated by previous works to ages between 99.6 -76 Ma with compositions ranging from basanitic to phonolitic. The evolved compositions were further separated into two groups. The porphyritic phonoliths – rich in melanite, noseana/hauyna, sanidine, clinopyroxene, titanite, apatite – and the slightly more differentiated subaphyric types, consisting of sanidine, noseana-hauyna and a low percentage of clinopyroxene. The project aims to investigate thermometry and fractional crystallization from whole rock geochemistry and mineralogical characterization. Initially, a pre-field bibliographic study of the area and topics on the application of geochemical methods to define trends and models for alkaline systems was carried out. Then, field work was carried out where samples of the three different petrographic types were collected in order to make petrographic slides and study mineral chemistry in an electronic microprobe throughout the mineralogical assembly. In addition, whole rock geochemistry data were compiled and together with the mineral chemistry data were applied in thermobarometry methods for petrogenesis studies at SAPC. Then, from the thermobarometric data, different conditions of crystallization were defined for each petrographic type, suggesting a more complex history than the previous proposals of an evolution purely by fractional crystallization.

Key-words: Phonolites, Igneous Petrology, Alkaline Magmatism, Geochemistry, EPMA, Thermobarometry.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS E METAS</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>ESTADO DA ARTE/REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
4.1	Rochas alcalinas:.....	17
4.2	Magmatismo alcalino na Bacia do Paraná.....	18
4.3	Suíte Alcalina Passo da Capela (SAPC) .....	19
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>21</b>
5.1	Investigação bibliográfica .....	21
5.2	Trabalho de Campo .....	22
5.3	Petrografia .....	23
5.4	Geoquímica de rocha total.....	23
<b>5.4.1</b>	<b>Fluorescência de Raio X (FRX)</b> .....	<b>23</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Microssonda eletrônica (EPMA)</b> .....	<b>24</b>
5.5	Termobarometria .....	25
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>26</b>
6.1	Geologia local.....	26
6.2	Petrografia .....	29
<b>6.2.1</b>	<b>Fonólitos porfiríticos</b> .....	<b>29</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Fonólitos subafíricos</b> .....	<b>32</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Lamprófiro</b> .....	<b>36</b>
6.3	Caracterização mineralógica .....	38
<b>6.3.1</b>	<b>Rochas porfiríticas</b> .....	<b>38</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Fonólitos subafíricos</b> .....	<b>51</b>
<b>6.3.3</b>	<b>Lamprófiro</b> .....	<b>55</b>
6.4	Geoquímica de rocha total.....	64
<b>6.4.1</b>	<b>Diagramas tipo-Harker dos elementos maiores:</b> .....	<b>68</b>

<b>6.4.2</b>	<b>Diagramas tipo-Harker para os elementos traços: .....</b>	<b>72</b>
<b>6.5</b>	<b>Termobarometria .....</b>	<b>76</b>
<b>6.5.1</b>	<b>Lamprófiro.....</b>	<b>76</b>
<b>6.5.2</b>	<b>Porfírica.....</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b>DISCUSSÃO: .....</b>	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES: .....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO A – Geoquímica de rocha total de da Silva (2018) .....</b>	<b>15</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As rochas alcalinas representam uma fração muito pequena das rochas ígneas encontradas na Terra. Todavia, são intensamente investigadas devido sua complexidade petrogenética e geotectônica e seu potencial econômico. No Brasil, as rochas alcalinas possuem um papel importante por serem manifestações magmáticas pós Serra Geral < 132Ma (Renne *et al.*, 1992; Turner *et al.*, 1994; Ernesto *et al.*, 2002), fornecendo informações sobre a manto após esta enorme manifestação da Província Magmática Paraná-Etendeka, marcadora da quebra do supercontinente Gondwana.

Este trabalho tem como objeto de investigação a Suíte Alcalina Passo da Capela (SAPC) localizada no Rio Grande do Sul, próximo à cidade de Piratini na região central do Estado. A SAPC é o último evento magmático inserido no contexto do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG). O primeiro estudo relacionado é de Ribeiro (1971) que descreve rochas intrusivas de caráter alcalino nesta região. Trabalhos posteriores também abordam o magmatismo alcalino desta suíte, como Barbieri *et al.* (1987), Burger *et al.* (1998), Viero (1998), Phillip *et al.* (2005), CPRM *et al.* (2009), Horota (2014) e da Silva (2018).

O número de ocorrências da SAPC é tema de debate entre os autores, todavia é indicada nos trabalhos a existência de pelo menos 34 corpos alcalinos na região, inicialmente descritos como fonólitos, fonólitos-tefritos e tefritos por Ribeiro (1971). No estudo mais recente, da Silva (2018) propõe um novo modelo evolutivo para a suíte, envolvendo um magma de afinidade basanítica que evoluiu para composições mais diferenciados como tefrito-fonólitos e fonólitos. Segundo este autor, as rochas fonolíticas apresentam diferenças mineralógicas e petrográficas, e são subdivididas entre fonólitos porfiríticos e fonólitos subafíricos, sendo estes últimos quimicamente mais evoluídos.

A partir da separação de 3 principais grupos petrogeoquímicos se sugere hipótese do fracionamento do basanita – presença de olivina e clinopiroxênio – para os fonólitos porfiríticos – presença de granada melanita, titanita, apatita, noseana-hauyna, clinopiroxênio e sanidina – e os fonólitos subafíricos – compostos por noseana-hauyna e sanidina.

Este trabalho propõe uma investigação integrada da petrografia e da geoquímica para discutir o processo e o comportamento dos elementos maiores e traços nos diagramas geoquímicos e estudos de termobarometria da SAPC.

## 2 OBJETIVOS E METAS

O trabalho possui o objetivo de estabelecer as relações petrogenéticas entre os litotipos da SAPC a partir de:

- I) Trabalhos de campo para mapeamento dos corpos e coleta de amostras;
- II) A separação dos tipos petrográficos e identificação de padrões geoquímicos;
- III) Entender os processos envolvidos durante a formação dessas rochas através da relação de litogeoquímica, da petrografia dos diferentes tipos litológicos e da química mineral.
- IV) Aplicação de termobarometria para tentar estabelecer as condições de cristalização dos magmas.

## 3 JUSTIFICATIVA

As rochas alcalinas representam uma parte muito importante para o entendimento da evolução da Terra. Através delas podemos compreender alguns processos de fusão do manto e as condições em que elas podem ocorrer. Essas rochas possuem um potencial econômico importante devido seu alto teor de álcalis,  $P_2O_5$  e com isso podem fornecer ingredientes importantes para agricultura e, em certas condições, podem ser usadas para exploração econômica por serem portadoras de elementos incompatíveis muito usados na indústria.

O conhecimento desenvolvido nos últimos anos sobre a SAPC por Barbieri *et al.* (1987), Burger *et al.* (1998), Viero (1998), Phillip *et al.* (2005), CPRM *et al.* (2009), Horota (2014) e da Silva (2018) foi muito relevante para a compreensão dos processos que envolvem a formação desta suíte magmática, todavia os trabalhos não possuem um detalhamento geoquímico envolvendo processos de cristalização fracionada e termobarometria.

## 4 ESTADO DA ARTE/REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Rochas alcalinas:

Sørensen *et al* (1974) estimam que as rochas alcalinas compõem menos de 1% do volume de rochas ígneas expostas. Estas são assim definidas por possuírem alto teor de elementos alcalinos e subdividas pelo grau de saturação em  $\text{SiO}_2$ . Entre os termos subsaturados ocorrem as rochas com feldspatóides que são frequentemente acompanhados por clinopiroxênios, feldspatos alcalinos e anfibólios sódicos. Estes autores estimam que estes litotipos são encontrados em riftes continentais, ambientes intraplaca vinculados a *hotspots* e em ambientes convergentes (subducção). Afirmam ainda que independente do ambiente petrogenético dessas rochas elas são geneticamente vinculadas a magmatismo mantélico de alta pressão e temperatura-

Na figura 1, observa-se que quimicamente pode-se classificar as rochas alcalinas subsaturadas em  $\text{SiO}_2$  como picro-basaltos, tefritos, basanito, foiditos, fonotefritos, tefrifonólitos e fonólitos. A figura 2 ilustra a classificação petrográfica no sistema QAPF, onde em geral superam o conteúdo de 10% de feldspatóide.

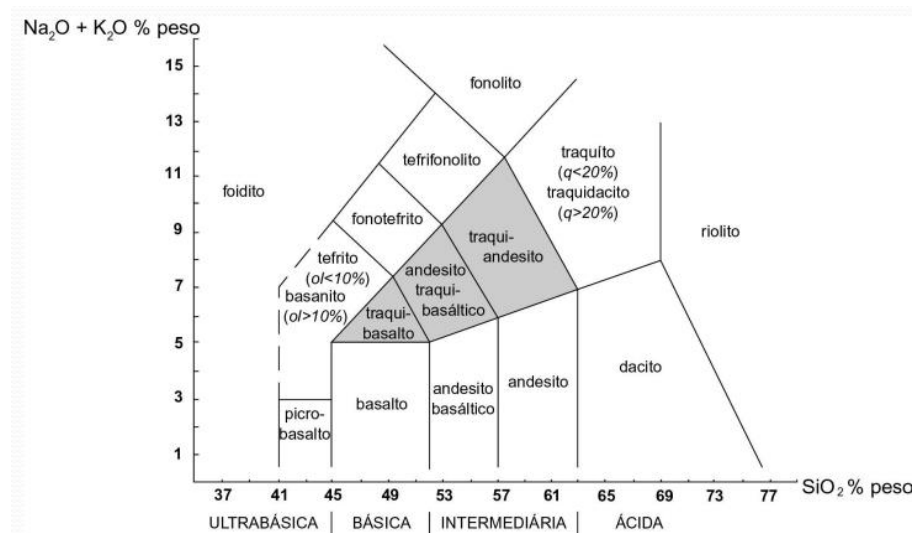


Figura 1: Diagrama TAS destacando nas áreas coloridas as séries alcalinas e fortemente alcalinas definidas pela IUGS com base em Le Maitre (2002).



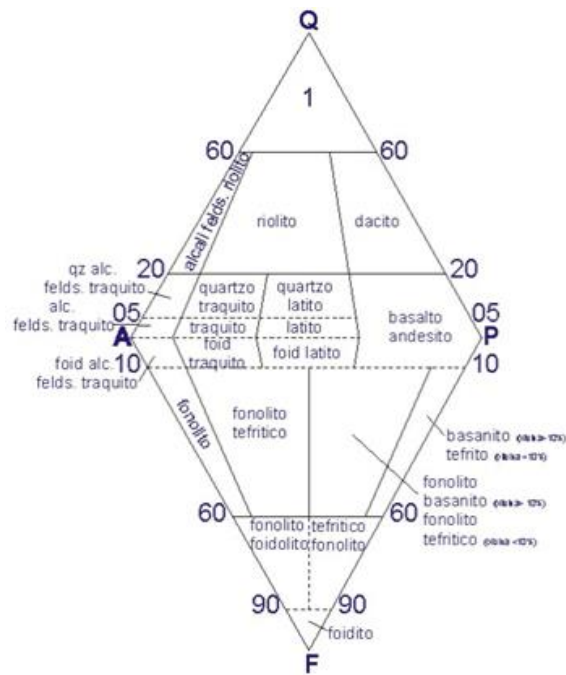


Figura 2: Diagrama QAPF de Le Maitre (2002) com nas nomenclaturas propostas pela IUGS (as rochas subsaturadas são as encontradas na porção inferior do diagrama).

#### 4.2 Magmatismo alcalino na Bacia do Paraná

De acordo com Comin-Chiaramonti & Gomes (2005) as principais ocorrências de rochas alcalinas na América do Sul estão no Brasil e no Paraguai. Essas possuem um limite temporal entre Permiano e Triássico podendo chegar ao início do Cenozoico, e em algumas porções do Uruguai e na Bolívia no início do Cretáceo.

Os autores definem que esse magmatismo alcalino está vinculado a uma porção temporal onde os processos erosivos já eram predominantes devido ao soerguimento das rochas da Bacia do Paraná e ocorrem muito próximos temporalmente da Formação Serra Geral. Dentro da plataforma Sul-Americana, o magmatismo ocorre de maneira intrusiva, hipabissal e vulcânica. Composicionalmente, variam desde sienito a intrusões mais rasas de composições máficas, ultramáficas, potássicas e ultra potássicas. Os autores avaliam que os principais minerais que compõe essas rochas são feldspatos, feldspatoides e clinopiroxênios, e as fases acessórias são apatita, titanita e minerais opacos.

Na ordem temporal, Comin-Chiaramonti & Gomes (2005) definem que os primeiros episódios de magmatismo alcalino fazem parte da Província Alto Paraguai e são de composições sieníticas, datando de 250-240 Ma. O segundo episódio é definido por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral que se encontram no Norte e Nordeste do Paraguai e datam de 145 Ma. O terceiro é definido pelas rochas dos distritos alcalinos-carbonatíticos como em Jacupiranga, com idades de 130 Ma. A quarta fase compreende idades de 120 Ma – Província de Misiones no Paraguai – até corpos alcalinos mais recentes na porção central do Brasil de 90-50 Ma e por fim corpos de afinidade sódicas no Paraguai que datam de 61-39 Ma.

#### 4.3 Suíte Alcalina Passo da Capela (SAPC)

A Suíte Alcalina Passo da Capela é localizada próxima aos municípios de Piratini e Canguçu, no Rio Grande do Sul. Os corpos foram identificados por Ribeiro (1971), que apenas define que essas rochas possuem uma afinidade alcalina. Após, Horbach (1986) define as rochas alcalinas como chaminés e descreve também a ocorrência de diques de olivina-diabásio em associação a elas, entretanto, Viero (1998) desvincula os diques desta suíte.

Os trabalhos mais recentes de mapeamento da SAPC são de Phillip *et al* (2005) e da CPRM (2009), onde a Suíte foi considerada como pelo menos 34 ocorrências que possuem no máximo 800 m de diâmetro. Os corpos intrudem o Complexo Metamórfico de Porongos, as rochas sedimentares da Formação Rosário do Sul e os granitos sin-transcorrentes da Zona de Cisalhamento Passo do Marinheiro. A figura 4 mostra o posicionamento da SAPC em relação às unidades geológicas e principais estruturas da Bacia do Paraná.

Tectonicamente o magmatismo é vinculado a reativação de falhas anteriores associadas a Província Mantiqueira por um processo tafrogênico, além da geração de novas falhas a partir destas dando então um *emplacement* com orientação NW para a Suíte (Burger *et al.*, 1983).

Dados químicos publicados por Horbach *et al.* (1986), definem as ocorrências como tefrifonólitos, fonotefritos e fonólitos; por Barbieri *et al.* (1987), classificam como

fonotefritos, fonólitos e fonólitos peralcalinos e por Burger *et al* (1998), que classificam apenas como fonólitos. No mapeamento geológico realizado pela CPRM (2009), essas rochas são classificadas a partir da mineralogia normativa em fonólitos, fonólitos tefríticos e traquitos. O trabalho mais recente que reclassifica química e petrograficamente estas rochas é o de da Silva (2018), onde o autor, a partir de dados geoquímicos insere um novo corpo máfico de composição basanítica, além de classificar o restante como tefrifonólitos e fonólitos. Petrograficamente, o autor identifica apenas fonólitos, separa os tipos porfirítico, e, subafíricos e com a geoquímica de rocha total, determina que as rochas mais diferenciadas são as afaníticas e as menos diferenciadas são as porfiríticas (figura 3). De acordo com o autor, essa diferença textural poderia refletir a diferenciação dos fonólitos porfiríticos para os fonólitos afaníticos.

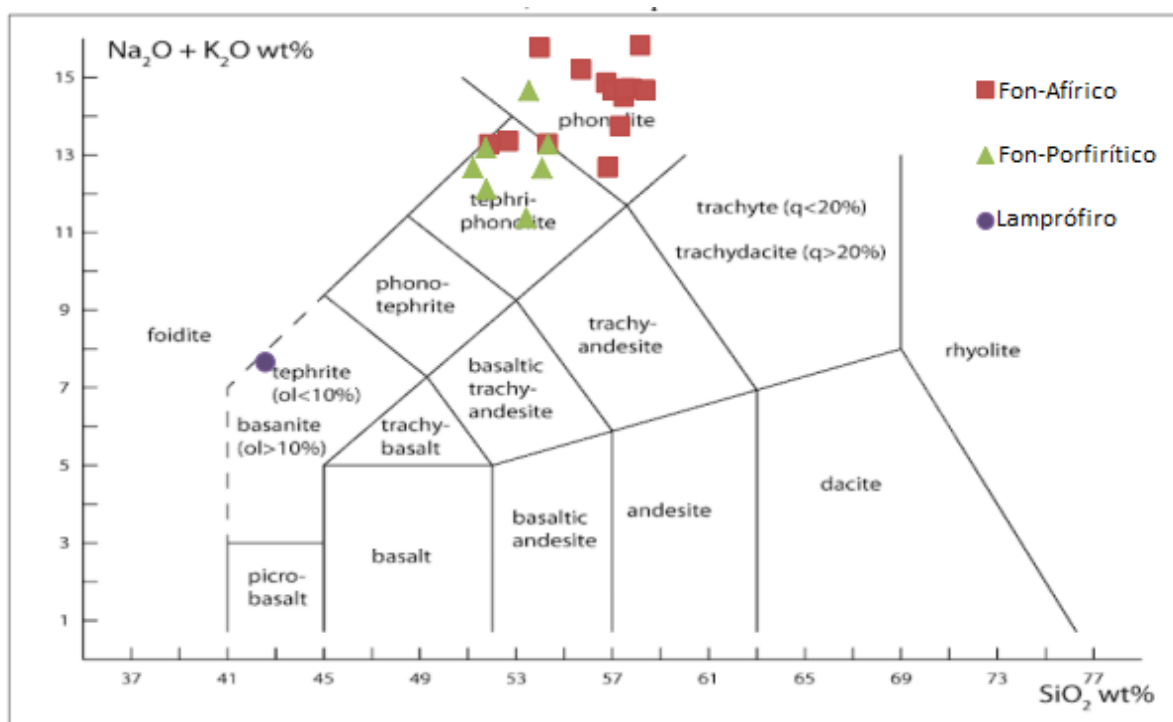


Figura 3: classificação química de Silva (2018), onde expõe diferenças petrográficas e uma possível indicação de diferenciação magmática na suíte.



Figura 4: Mapa da porção sul da Plataforma Sulamericana, onde a SAPC é destacada (Baitelli et al. 2005).

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Investigação bibliográfica

Inicialmente foi realizada uma compilação de mapas da SAPC e, considerando as descrições das dimensões dos corpos, grau de alteração, dados

petrográficos e litoquímicos, a partir do estudo de da Silva (2018). Seleccionamos 10 corpos intrusivos para a realização do presente estudo. Estas intrusões foram classificadas pelo autor como: fonolitos afaníticos – pontos 18, 22, 38, 39; fonolitos porfíricos - chamados de pontos 20, 25, 26, 34, 37; e, por final, a única ocorrência dita como basanítica foi nomeada como ponto 14 (figura 5).

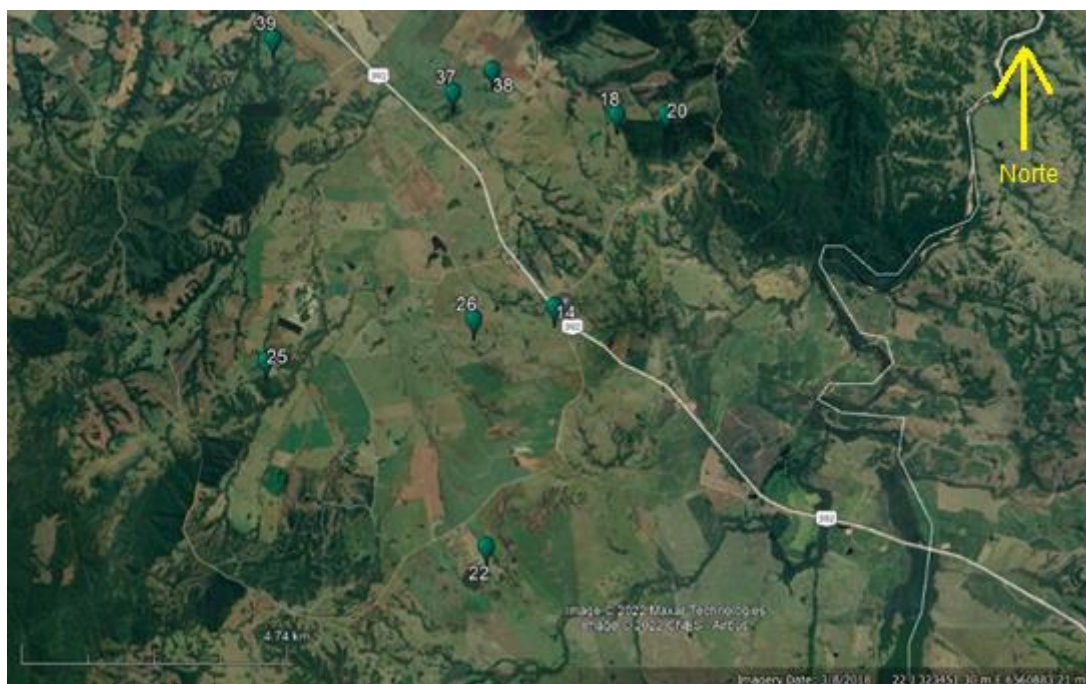


Figura 5: Mapa dos pontos visitados gerado pelo autor a partir de imagem de satélite do Google Earth.

## 5.2 Trabalho de Campo

No período de 19 a 22 de setembro de 2022, foi realizada a etapa de campo para mapeamento dos corpos e a coleta de amostras dos pontos selecionados nas proximidades dos municípios de Canguçu e Piratini.

As amostras coletadas foram encaminhadas para confecção de lâminas delgadas e análise de litoquímica (fluorescência de raio X – FRX – para elementos maiores e traços) com finalidade de análise petrográfica e classificação litoquímica das ocorrências, respectivamente. Todavia, devido problemas com a geração de dados, foram 23 análises elementos maiores e traço extraídos de da Silva (2018) como base de geoquímica para este trabalho.

### 5.3 Petrografia

Um total de 10 novas lâminas delgadas – uma de cada intrusão selecionada como alvo de estudo – foram confeccionadas para a realização de petrografia de detalhe. A seleção fundamentou-se em granulação, texturas, associação mineral e classificação no sistema QAPF.

### 5.4 Geoquímica de rocha total

Foram utilizadas 23 análises químicas de rocha total previamente trabalhadas por da Silva (2018) para elementos maiores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e traços (Ba, Cr, Nb, Ni, Pb, Sr, Rb, Y, Zn, Zr).

Os dados de litoquímicos foram plotados nos diagramas do tipo Harker, no TAS de Le Bas *et al.* (1986),  $\text{R1xR2}$  de De La Roche *et al.* (1980),  $\text{Zr/TiO}_2$  de Winchester e Floyd (1977), no diagrama de peralcalinidade e no  $\text{A/CNK-A/NK}$  de Shand (1943) para a classificação litoquímica e estudos de diferenciação magmática.

#### 5.4.1 Fluorescência de Raio X (FRX)

Foram usadas as 23 análises publicadas por da Silva (2018), em que foram realizadas análises de ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Fe (total),  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , perda ao fogo) e dos elementos traço (Ba, Cr, Nb, Ni, Pb, Sr, Rb, Y, Zn, Zr). O equipamento utilizado um Espectrômetro de Fluorescência de raio X modelo RIX 2000 da marca Rigaku do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CPGq – Igeo – UFRGS)

O método se baseia na interação de fótons de alta temperatura que incidem na eletrosfera e a partir da reorganização dos elementos químicos presentes nas amostras, a partir disso são gerados fótons de raios x com energia característica do elemento que foi excitado. A quantidade de raios x característicos emitidos é equivalente a concentração do elemento na amostra. A FRX permite resultados quantitativos, utilizando padrões de rocha de composição conhecida para calibração

dos elementos a serem analisados. Como nessa técnica a amostra é preparada a partir de um pó da rocha, ela possibilita a quantificação de "rocha total" no material amostrado. Observa-se que o fechamento correto deve-se ser de 100% com 2% de erro máximo permitido.

#### 5.4.2 Microsonda eletrônica (EPMA)

O método funciona através de um feixe de elétrons que incide e excita a amostra de modo que esta emita raios x característicos. Estes são detectados por cinco espectrômetros e são comparados aos padrões que são lidos nas mesmas condições, permitindo quantificar a composição química pontual em minerais. A microsonda eletrônica também permite a geração de mapas composicionais de raios x, que são imagens químicas de determinadas áreas pré-definidas. Estas imagens podem destacar padrões de zonação em minerais ou a composição de uma matriz hipocristalina.

As composições químicas dos minerais analisados nesta pesquisa foram realizadas em uma Microsonda Eletrônica Cameca SXfive (figura 6) do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CPGq-IGEO-UFGRS). Os protocolos analíticos utilizados não foram iguais para todos os minerais, uma vez que devido as suas características, alguns minerais podem ser mais sensíveis à energia do feixe de elétrons, como é o caso dos feldspatoides, ou necessitarem de correntes mais elevadas, como é o caso da granada. Para a análise de piroxênios, micas, K-feldspato e olivinas foi utilizada a seguinte rotina: 15keV, 15nA e abertura do feixe de 5 $\mu$ m; os padrões foram: sanidina para K, Si e Al; rutilo para Ti; albita para Na; hematita para Fe; rodonita para Mn, diopsídio para Ca e Mg; óxido de Cromo para Cr. Para a análise da granada, foi utilizada a mesma configuração anterior, porém nas condições de 15keV, 20nA e abertura do feixe de 5 $\mu$ m. A análise dos feldspatoides demandou um trabalho experimental para a definição das melhores condições analíticas visando evitar perdas de elementos, especialmente o Na, muito sensível à energia aplicada (Lima, T. S. D., & Silva, M. D. D., 2019; Lima et al., 2019). Foram aplicadas duas

calibrações, ambas com resultados adequados: uma com 15 keV, 2 nA e abertura do feixe de 20  $\mu\text{m}$  e outra com 15k eV, 0,5 nA e abertura do feixe de 20  $\mu\text{m}$ , ambas com tempos de contagem de 30 a 240 s; os padrões utilizados foram: sanidina para K, Si e Al; rutilo para Ti; albita para Na; hematita para Fe; rodonita para Mn, Cr-Diopsídio para Ca e Mg, BaSO<sub>4</sub> para Ba e S; SrSO<sub>4</sub> para Sr e tugtupita para Cl. Os erros aceitáveis nessa técnica são de (+/-) 2% e OH e H<sub>2</sub>O não são analisados.



Figura 6: Fotografia da microsonda eletrônica SXfive do CPGq – Igeo – UFRGS.

## 5.5 Termobarometria

O modelo barométrico (Neave e Putirka, 2017 – figura 7) consiste em um cálculo, o qual requer a inserção de um “líquido” que pode ser a composição de parte ou de toda a rocha, ou ainda alguma composição modelizada (por algum programa de fracionamento, por exemplo), objetivando inserir o que mais provavelmente estava em equilíbrio com o clinopiroxênio examinado durante sua cristalização. Uma diversidade de questões e dificuldades analíticas compõe o quadro da complexidade em obter esses dados para rochas vulcânicas como observado por Neave e Putirka,



(2017), que enumeram as imprecisões na determinação de Na em análises químicas e também nos experimentos em fornos abertos.

$$P(\text{kbar}) = -26.27 + 39.16 \frac{T(\text{K})}{10^4} \ln \left[ \frac{X_{\text{Jd}}^{\text{Cpx}}}{X_{\text{NaO}_2}^{\text{liq}} X_{\text{AlO}_{1.5}}^{\text{liq}} (X_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}})^2} \right] - 4.22 \ln(X_{\text{DiHd}}^{\text{Cpx}}) + 78.43 X_{\text{AlO}_{1.5}}^{\text{liq}} + 393.81 (X_{\text{NaO}_2}^{\text{liq}} X_{\text{KO}_2}^{\text{liq}})^2$$

Figura 7: Equação de Neave e Putirka (2017) para geobarometria de clinopiroxênios (P (kbar)= pressão em quilobar; T (K) = temperatura em graus Kelvin;  $X_{\text{Jd}}^{\text{Cpx}}$  = quantidade molar de Jadeíta no clinopiroxênio;  $X_{\text{NaO}_2}^{\text{liq}}$  = quantidade de NaO<sub>2</sub> no líquido;  $X_{\text{AlO}_{1.5}}^{\text{liq}}$  = quantidade de alumínio no líquido;  $X_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$  = quantidade de sílica no líquido;  $X_{\text{DiHd}}^{\text{Cpx}}$  = quantidade de Diopsídio e Hedembergita no clinopiroxênio).

Já para o cálculo da temperatura é feito a partir de Putirka (2008), onde o autor explica que o cálculo é feito de forma de ter em equilíbrio entre as fases de Jadeíta (Jd), Hedembergita (Hd), e Diopsídio (Di) e o líquido a partir de cálculos de regressão linear. Estes cálculos contam com o cálculo de composição de um provável clinopiroxênio formada àquela temperatura versus a composição que foi cristalizada e a partir disso é calculada a temperatura de formação daquele mineral.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Geologia local

Foram descritos três tipos de afloramentos (figuras 8, 9 e 10): I) que constituem pequenos morros, com no máximo 20 metros de altura por 100 metros de largura, com formas circulares; II) pequenos afloramentos de matacões com dimensão máxima de 1x1 metro; III) diques em encostas de morrotes das rochas encaixantes com dimensões aproximadas entre 5 metros de altura por 4 metros de largura.

Todavia, nota-se que as diferenças petrográficas e texturais não se relacionam com os tipos e/ou tamanhos dos afloramentos. Além disso, não são observadas feições de exposição nem indicadores de metamorfismo no contato com as encaixantes. Em todos os casos, observa-se em campo uma vegetação mais densa associada a essas rochas e um intenso fraturamento dos afloramentos com padrão de orientação em NO-SE seguindo a estruturação do *Graben* Arroio Moirão (Borsa, 2017) ao qual estes corpos intrusivos estão regionalmente associados.

Frequentemente são observadas rochas brechadas de provável origem sedimentar (siltitos e arenitos) vinculadas a orientação de fraturamento presente nos afloramentos da SAPC.



Figura 8: afloramento com morro de aproximadamente 20 m x 100 m.



Figura 9: afloramento de blocos e pequenos matacões de 1 m x 1 m.

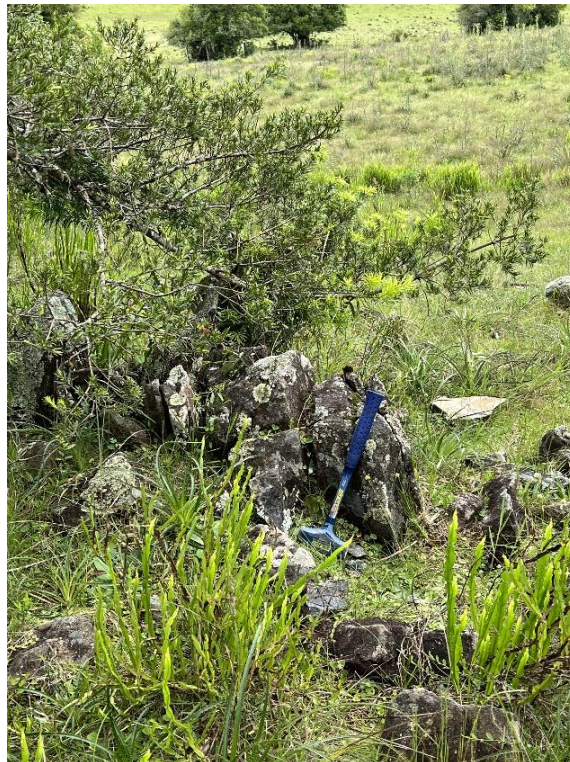


Figura 10: dique de ocorrência fonolítica.

## 6.2 Petrografia

As rochas foram analisadas petrograficamente e foram separadas de acordo com a classificação mais recente de da Silva (2018). Os fonólitos porfiríticos (FP) correspondem aos pontos: 20, 25, 26, 34, 37; os fonólitos subafíricos (FA): 18, 22, 38, 39; e a rocha descrita agora como dique de lamprófiro (LAMP): 14. Os pontos estudados foram representados na figura 5. Cada tipo petrográfico será descrito a seguir:

### 6.2.1 Fonólitos porfiríticos

Os fonólitos porfiríticos são rochas petrograficamente descritas como subvulcânicas porfiríticas com fenocristais de 15-30 % (em ordem de abundância) de sanidina (comumente zonada), clinopiroxênio (ocorrem como duas variedades zonadas e uma não zonada, que serão detalhadas no próximo item), noseana e frequentemente granada do tipo melanita (zonada), as dimensões de toda assembleia mineralógica é de aproximadamente 0,5 cm, chegando ao máximo a 2 cm (figuras 11A, 11B e 11C), com exceção dos feldspatos alcalinos que podem ocorrer como megacristais envolvendo a matriz podendo ter tamanhos de até 5 cm (figuras 12A e 12B).

A matriz é composta por feldspato alcalino e feldspatoide, podendo ou não possuir clinopiroxênios e granada melanita, que ocorrem como variedades não zonadas. Frequentemente a matriz possui textura traquítica marcada principalmente pela orientação dos cristais de feldspato alcalino. Os minerais acessórios frequentemente são encontrados como inclusões na granada e nos piroxênios e como fenocristais de titanita e apatita (figuras 13A, 13B e 14A, 14B). Comumente os fenocristais apresentam textura glomeroporfirítica constituída principalmente por feldspato alcalino, clinopiroxênio e granada (figura 14A e 14B). Além disso, são encontrados enclaves máficos constituídos principalmente por cristais de clinopiroxênio e subordinadamente por feldspatoide, biotita, titanita, apatita e óxidos de ferro e titânio (figuras 15A e 15B).



Figura 11: a e b- Fotomicrografia representativa da rocha porfirítica mostrando fenocristais de sanidina, clinopiroxênio, granada e feldspatoides (condições de aquisição da imagem A= nicóis paralelos (PP) e B= nicóis perpendiculares (PC)) C - Rocha porfirítica com fenocristais de piroxênio (Px), k-feldspato (Kf), feldspatoide (Foide) e enclave de granulação fina (círculo vermelho).



Figura 12: Fotomicrografia representativa de megacristal de sanidina com zonação concêntrica com feições de corrosão e inclusões de piroxênio, feldspatoide e titanita (A- PC; B- PP).



Figura 13: Fenocristais de clinopiroxênio com inclusão de apatita, feldspatoide intensamente carbonatado e granada melanita com inclusões de titanita, apatita e clinopiroxênio (A- PC; B- PP).

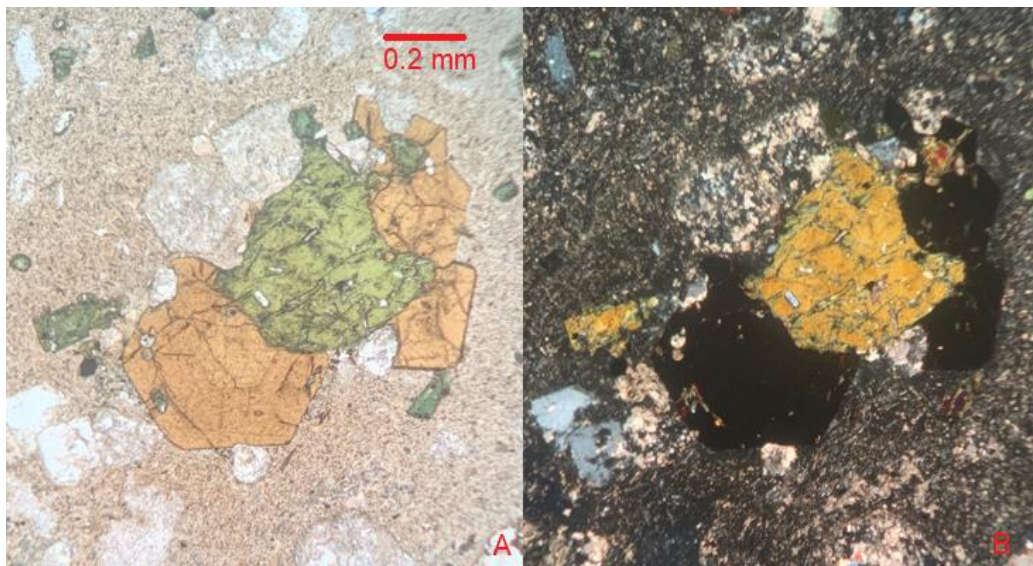


Figura 14: Rocha porfírica com textura glomeroporfírica (A- PC; B- PP).

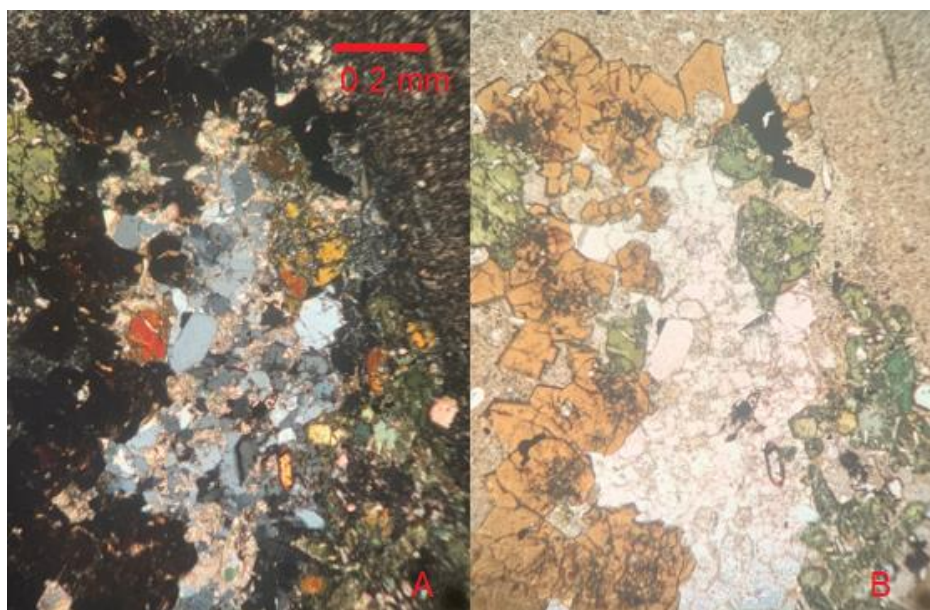


Figura 15: Fotomicrografia representativa de enclave composto por sanidina, biotita, clinopiroxênio, noseana e acessórios em rocha porfírica (A- PC; B- PP).

### 6.2.2 Fonólitos subafíricos

Os fonólitos subafíricos foram assim denominados por possuírem uma baixa quantidade de fenocristais. Petrograficamente, são classificadas como rochas subvulcânicas com uma quantidade inferior de 5% de fenocristais, estes com no

máximo 5mm em sua maioria de sanidina com zonação concêntrica e de feldspatoide do grupo da sodalita (figura 16A,16B e 16C). Raramente são encontrados fenocristais de melanita e augita, os quais apresentam frequentemente texturas de desequilíbrio (figura 17).

A matriz frequentemente possui textura traquítica e é composta por sua grande maioria por sanidina e feldspatoide do grupo da sodalita e subordinadamente augita e granada melanita (figura 18A e 18B). Os minerais acessórios são titanita e apatita, que ocorrem frequentemente como inclusões nos feldspatos alcalinos ou, mais raramente, como fenocristais, variando de 0.1-0.5 mm.





Figura 16: A e B- Fotomicrografia de rocha subafírica com megacristal de feldspato alcalino zonado (A- PC ; B- PP). C - Rocha subafírica com raros fenocristais de feldspato alcalino.

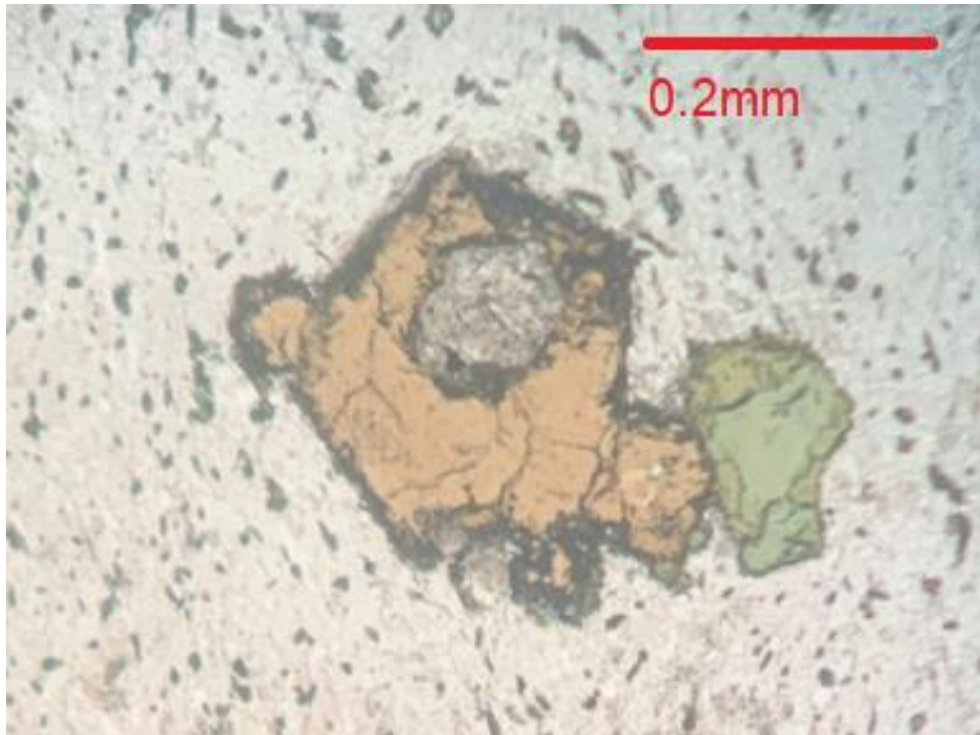


Figura 17: Fotomicrografia de granada e clinopiroxênio em desequilíbrio com a matriz em rocha subafírica. (PP).

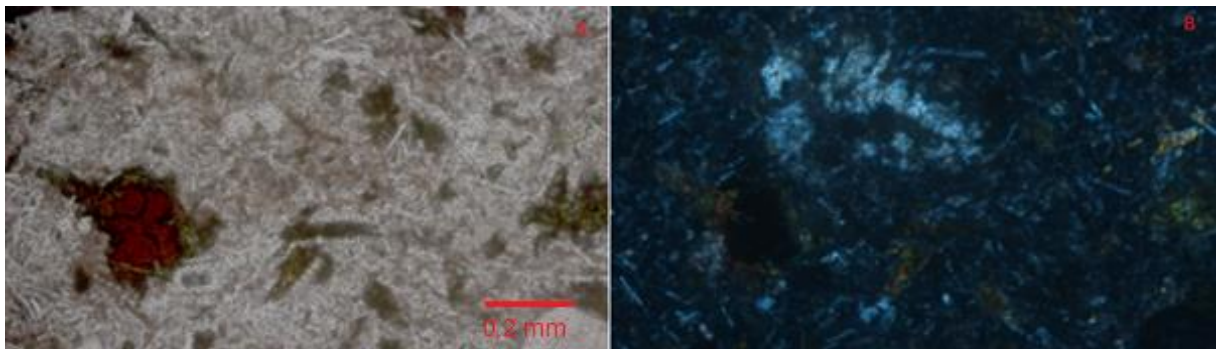


Figura 18: A e B- Fotomicrografia de rocha subafíricas com cristais de granada e clinopiroxênio na matriz subordinados ao resto da assembleia mineral (A- PB; B- PC).

### 6.2.3 Lamprófiro

Originalmente, esta rocha foi descrita por da Silva (2018) como uma rocha com composição basanítica, todavia, petrograficamente, neste trabalho, foi classificada como um lamprófiro por não possuir olivina normativa maior que 10 % e, texturalmente, possuir todos os fenocristais máficos e os minerais félsicos somente na matriz. Este tipo petrográfico só possui uma ocorrência e é interpretado por este autor como a rocha mais primitiva da suíte.

Petrograficamente, pode ser descrita como uma rocha subvulcânica porfirítica com fenocristais de clinopiroxênio (diopsídio e hedembergita), em sua grande maioria com tamanhos variando de 2 a 7 mm, frequentemente zonados com padrões de zonação normal e de zonação inversa (figuras 19A e 19B). – Subordinadamente, há raros fenocristais de olivina, biotita, titanita e apatita, com tamanhos de no máximo 4 mm. A matriz é composta em sua maioria por minerais félsicos, sanidina e noseana (figura 20A e 20B).

Além disso, um intenso processo de carbonatação é observado. Este ocorre em forma de bolsões com no máximo 2 cm, possui uma textura com aumento da granulometria dos carbonatos em direção contrária ao contato (figuras 21A e 21B) e com a presença xenocristais de plagioclásio e clinopiroxênio. Esta textura pode ser interpretada como decorrente de um processo pós-magmático ou como um líquido que, por algum processo de imiscibilidade, se separou do líquido silicático e foi preservado em forma de bolsões na rocha.

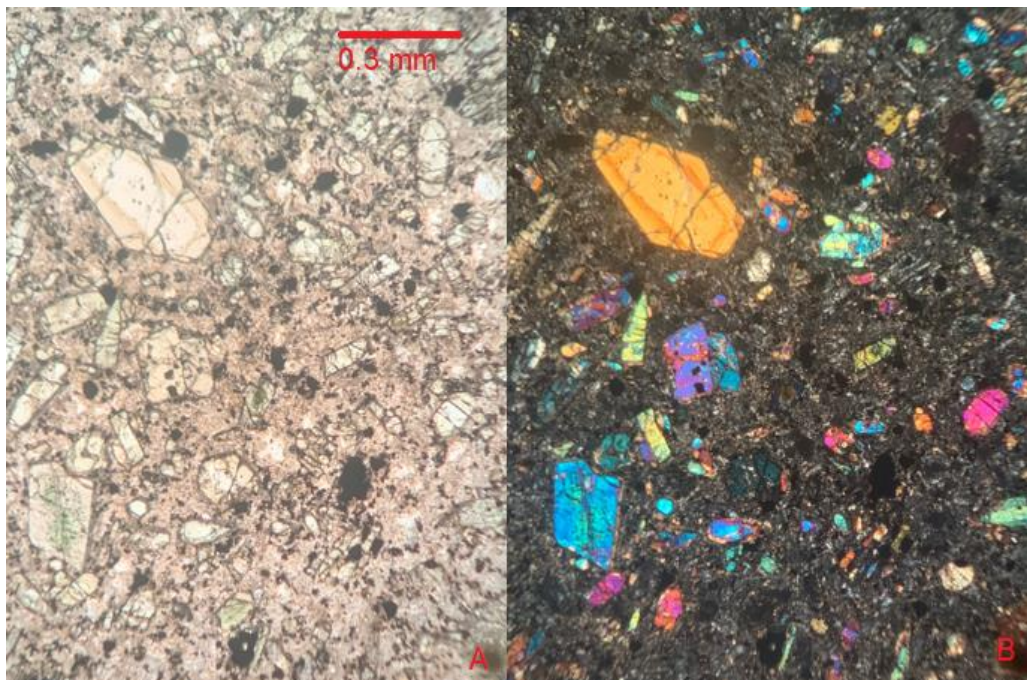


Figura 19: Fotomicrografia evidenciando os diferentes cristais de clinopiroxênios no lamprófiro (A- PP ; B- PC).

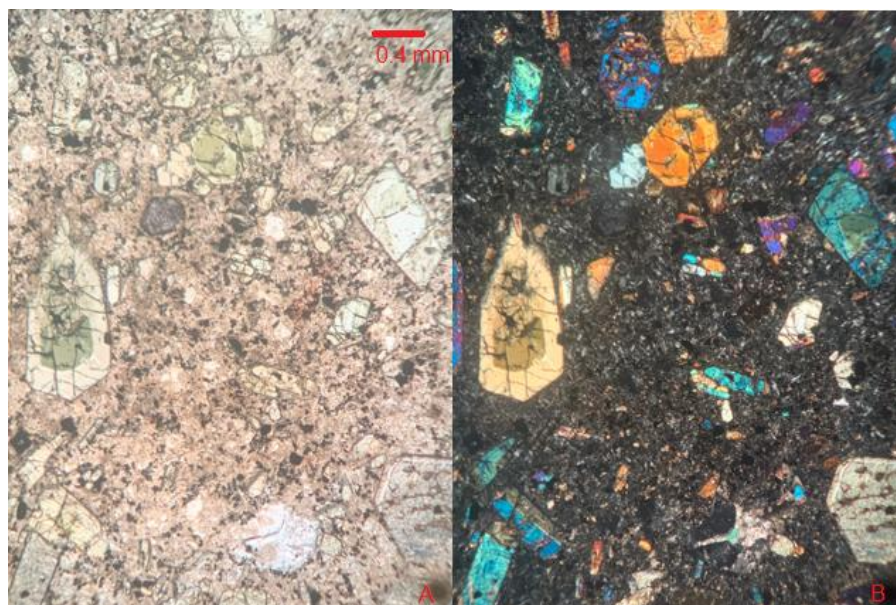


Figura 20: Fotomicrografia em lâmina delgada mostrando os fenocristais de clinopiroxênio e os félsicos na matriz (A- PP; B – PC).

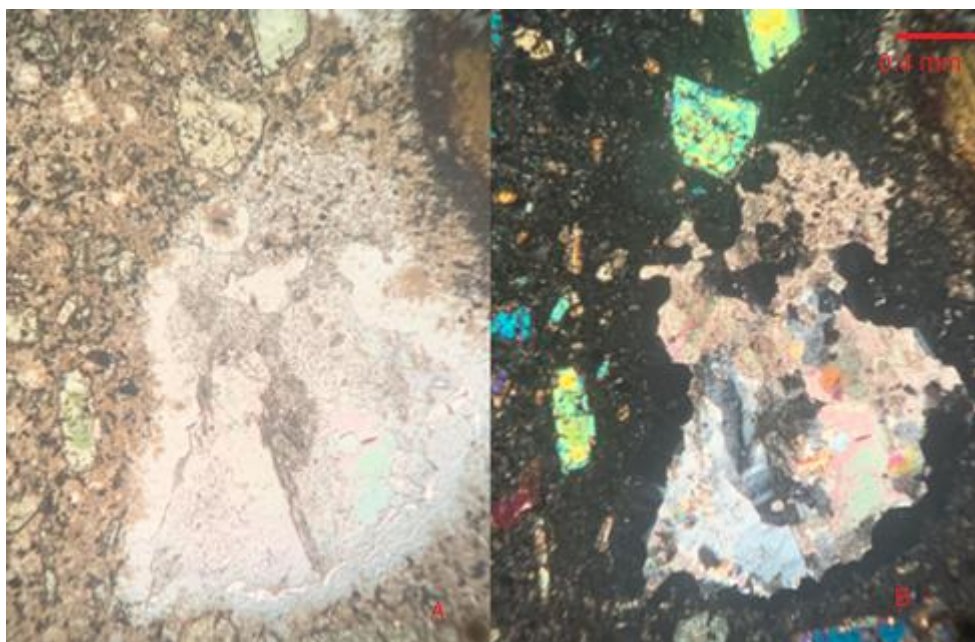


Figura 21: Fotomicrografia em lâmina delgada evidenciando o bolsão de carbonato (A-PP; B-PC).

### 6.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica está organizada por mineral em cada tipo petrográfico contendo a descrição das feições mineralógicas observadas por microscopia óptica e eletrônica, e os dados de química mineral obtidos por microsonda eletrônica.

#### 6.3.1 Rochas porfíricas

Nas rochas porfíricas, foram analisados os clinopiroxênios com objetivo de entender os diferentes tipos de zonação e caracterizar quimicamente cada variedade presente. Para isto, foram feitos perfis centro-borda e análises dos piroxênios da matriz. Além destes minerais, foram feitas análises no feldspato alcalino, no feldspatoide, na granada, nos minerais acessórios e nos enclaves máficos.

- *Piroxênios:*

Os piroxênios foram separados em quatro diferentes tipos: I) clinopiroxênio zonado com o centro incolor homogêneo e com borda de coloração verde; II) clinopiroxênio de coloração verde amarelado não zonado (composição homogênea); III) clinopiroxênio zonado concentricamente com núcleo verde e borda verde; IV) piroxênio da matriz que devido às suas dimensões muito pequenas não apresentaram bons resultados de química mineral e, portanto, não serão detalhados nesse estudo. Nas figuras 22a e 22b podemos observar todos os tipos.

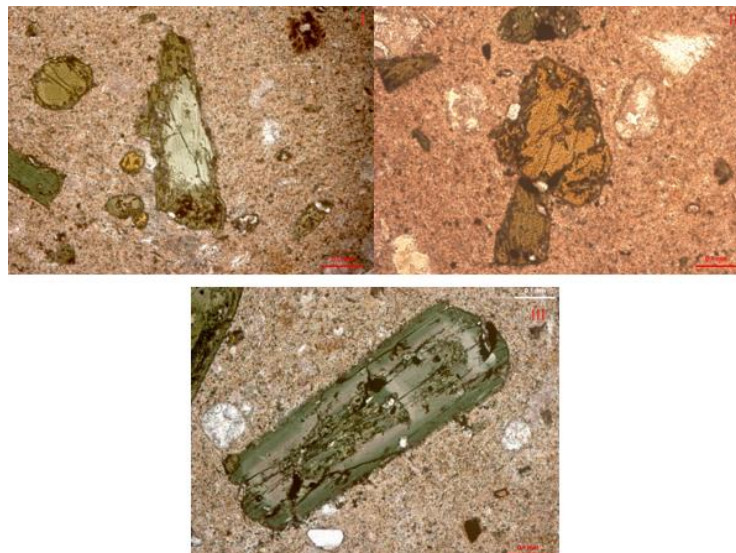


Figura 22a: clinopiroxênios do tipo I) centro incolor e bordas verdes, II) homogêneo amarelado e III) centro verde e borda verde. (a- PP)

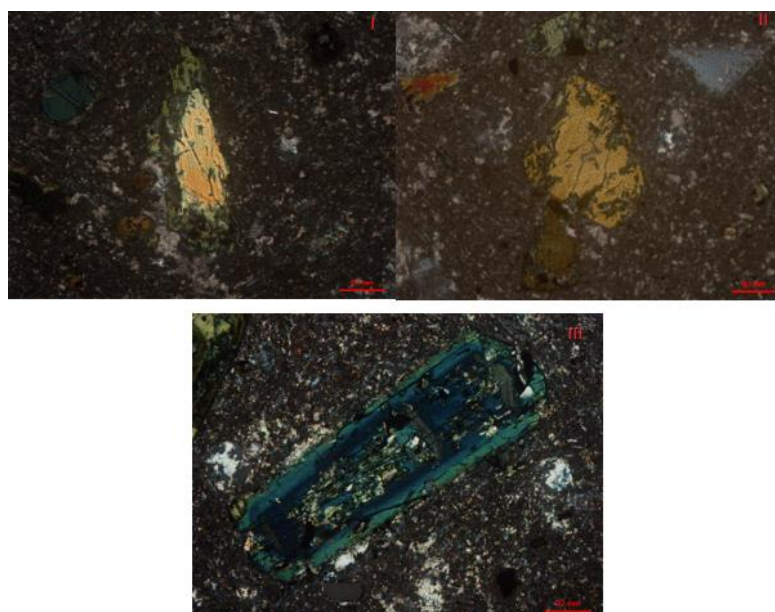


Figura 22b: clinopiroxênios do tipo I) centro incolor e bordas verdes, II) homogêneo amarelado e III) centro verde e borda verde (b-PC)

I) *Piroxênios com centro incolor e borda verde:*

A primeira população de clinopiroxênios é caracterizada por possuir um centro incolor com texturas de reabsorção e sem uma zonação óptica, e as bordas de coloração esverdeada com pequenas zonações ópticas visíveis. A partir da tabela 1 e da classificação no diagrama de Morimoto (1988) (figura 23) podemos observar que as zonações presentes na população tratam-se de zonações normais – que migram da fase mais rica em Mg =  $(\text{Ca}_{0.876}\text{Na}_{0.030})(\text{Fe}^{3+}_{0.048}\text{Fe}^{2+}_{0.256}\text{Mg}_{0.631})(\text{Si}_{0.982}\text{Al}_{0.018})$  para rica em Fe =  $(\text{Ca}_{0.862}\text{Na}_{0.136})(\text{Fe}^{3+}_{0.293}\text{Fe}^{2+}_{0.396}\text{Mg}_{0.239})(\text{Si}_{0.895}\text{Al}_{0.105})$  do centro para a borda do grão – e que o núcleo foi classificado como diopsídio e as bordas como hedembergita.

Tabela 1: análises representativas de clinopiroxênio com centro incolor e borda verde em perfil centro-borda (resultados em porcentagem em peso de óxido).

Região	FeO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Total	Wo	En	Fs
Borda	21,0	1,78	4,40	45,53	1,47	0,98	4,09	20,45	99,76	47	13	40
Borda	21,0	1,68	4,64	45,12	1,45	1,03	4,00	20,69	99,57	48	12	40
Borda	20,2	1,74	4,25	45,85	1,46	1,11	4,27	20,59	99,62	48	13	39
Núcleo	10,5	0,41	0,95	52,30	1,82	0,24	12,41	21,79	100,43	46	35	19

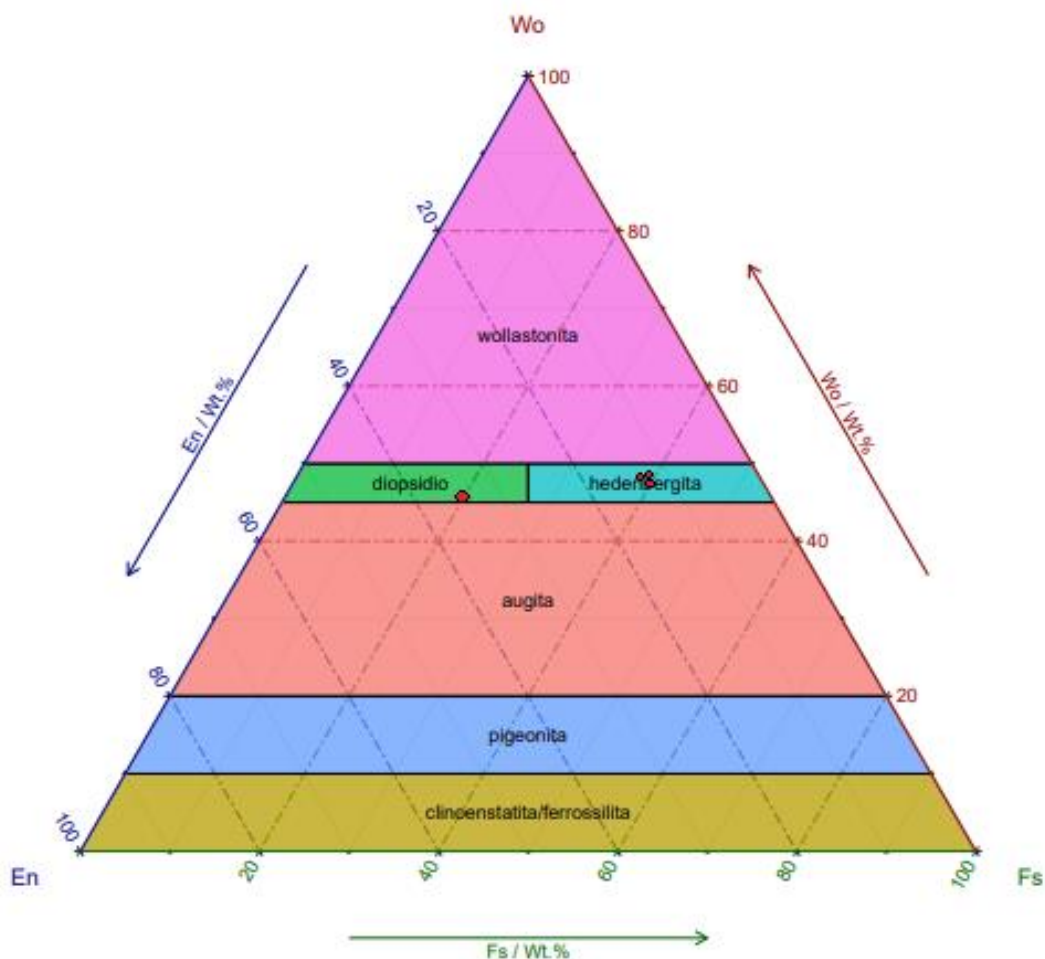


Figura 23: Diagrama ternário de Morimoto (1988) representativo dos piroxênios de centro incolor e borda verde dos fonólitos porfíricos.

II) *Piroxênios não zonados com coloração verde amarelada*

A segunda população de clinopiroxênios é caracterizada por não possuir uma zonação óptica e ser de coloração verde amarelada. A partir da tabela 2 e da classificação no diagrama de Morimoto (1988) (figura 24), podemos observar que não há zonações presentes na população, indicando uma fase de composição de diopsídio ( $\text{Ca}_{0.926}\text{Na}_{0.064}(\text{Fe}^{3.0.142}\text{Fe}^{2.0.148}\text{Mg}_{0.647})(\text{Si}_{1.830}\text{Al}_{0.201})$ ) em equilíbrio com o magma.



Tabela 2: análises representativas de clinopiroxênio verde amarelado em perfil centro-borda. (Resultados em porcentagem em peso dos óxidos).

Região	FeO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Total	Wo	En	Fs
Borda	9,33	0,89	4,57	49,15	0,21	1,13	11,65	23,21	100,83	0,538	0,376	0,086
Borda	9,60	0,96	5,34	48,06	0,21	1,29	12,63	23,04	100,56	0,547	0,417	0,036
Borda	7,66	0,69	5,51	47,77	0,17	1,94	12,61	23,77	100,34	0,549	0,405	0,046
Núcleo	7,52	0,67	6,42	47,07	0,16	2,01	11,90	23,77	100,10	0,555	0,387	0,058

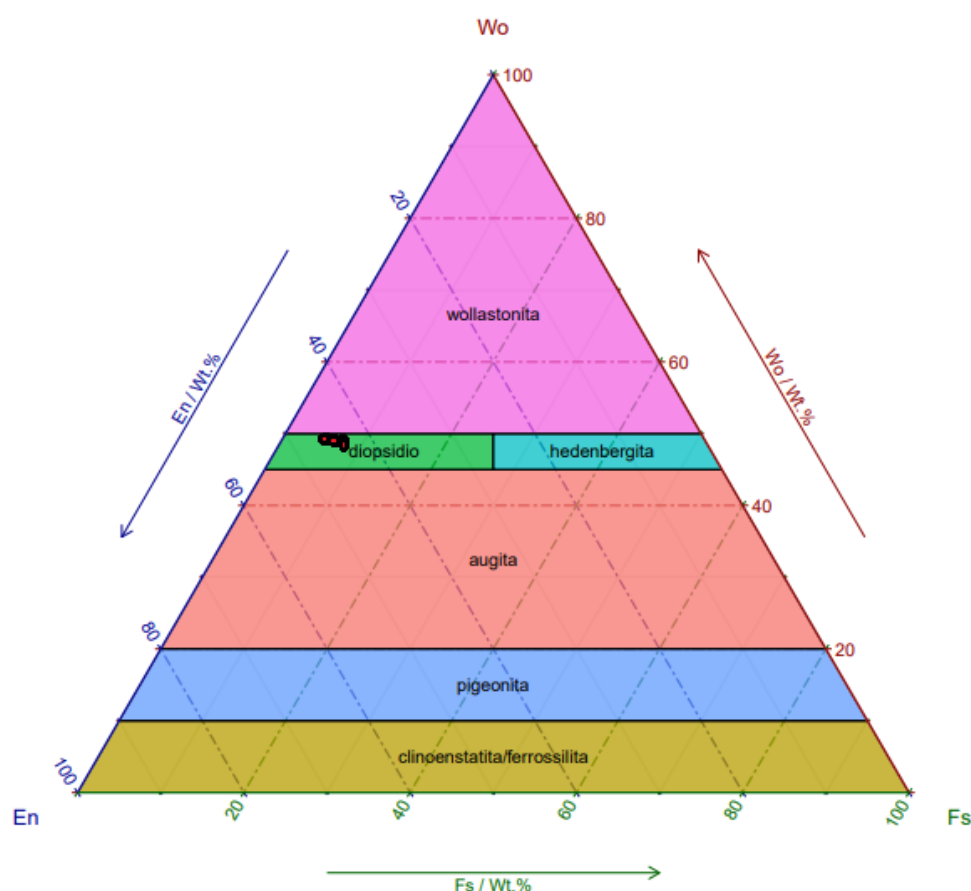


Figura 24: Diagrama ternário de Morimoto (1988) representativo dos piroxênios de coloração verde amarelada.

### III) Piroxênios zonados concentricamente com núcleo verde e borda verde:

Esta população de clinopiroxênios é caracterizada por possuir um centro com coloração verde com texturas de reabsorção e sem uma zonação óptica e as bordas verdes com pequenas zonações ópticas visíveis. A partir da tabela 3 e da classificação

no diagrama de Morimoto (1988) (figura 25), podemos observar que as zonações presentes na população tratam-se de zonações normais – que migram da fase mais rica em Mg =  $(Ca_{0.892}Na_{0.097})(Al_{0.069}Fe^{3+}_{0.244}Fe^{2+}_{0.253}Mg_{0.381})(Si_{0.838}Al_{0.162})$  para mais rica em Fe =  $(Ca_{0.887}Na_{0.110})(Al_{0.039}Fe^{3+}_{0.292}Fe^{2+}_{0.309}Mg_{0.320})(Si_{0.852}Al_{0.148})$  do centro para a borda do grão– e que apesar da variação composicional o mineral é classificado como hedembergita.

Tabela 3: análises representativas de clinopiroxênio verde com borda incolor em perfil centro-borda. (Resultados em percentagem em peso dos óxidos).

Região	FeO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Total	Wo	En	Fs
Cpx 1 –Borda	18,5	1,46	7,30	43,87	1,32	5,53	21,30	100,01	48	18	34
Cpx 1- Borda	18,4	1,43	7,03	43,90	1,31	5,55	21,33	99,65	49	18	33
Cpx 1- Meio	17,1	1,27	8,82	42,54	1,71	5,66	21,55	99,30	50	19	31
Cpx 1- Núcleo	17,3	1,37	8,85	42,60	1,69	5,78	21,65	99,73	50	18	32
Cpx 2- Borda	15,7	1,33	8,73	42,75	1,82	6,55	21,85	99,24	50	21	29
Cpx 2- Meio	15,5	1,29	8,62	43,37	1,86	6,72	21,55	99,39	50	22	28
Cpx 2- Núcleo	16,1	1,47	9,02	42,61	1,82	6,08	21,81	99,47	50	20	30

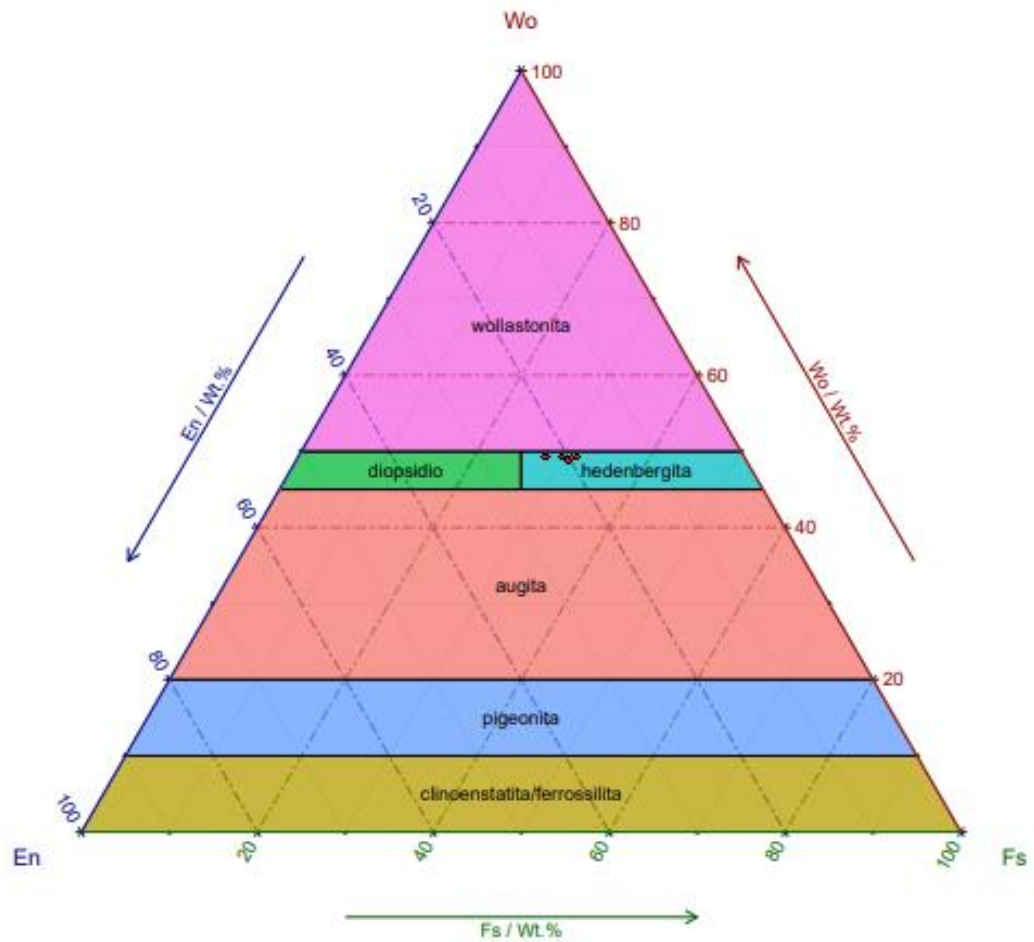


Figura 25: Diagrama ternário de Morimoto (1988) representativo dos piroxênios verdes das rochas porfíricas.

#### - Feldspatos Alcalinos

Foram realizadas análises químicas nos fenocristais dos feldspatos alcalinos (tabela 4) que evidenciam composições ricas em  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ . Nota-se que há uma variação entre os teores de albita e ortoclásio, todavia foram classificados como sanidina, (diagrama ternário, figura 26).

Tabela 4: análises representativas de feldspatos em perfil centro-borda. (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

Região	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Total	An	Ab	Or
1.CENTRO	3,09	18,54	64,72	12,82	0,06	99,56	00	27	73
1.CENTRO	4,93	18,91	65,52	10,60	0,09	100,34	00	41	59
1.BORDA	6,68	20,44	62,95	8,64	0,00	99,47	00	54	46
1.BORDA	6,05	20,64	62,33	9,19	0,00	98,94	00	50	50
2.CENTRO	9,53	24,60	58,59	7,15	0,01	100,88	00	67	33
2.BORDA	3,14	19,23	64,33	11,92	0,11	99,09	00	29	71

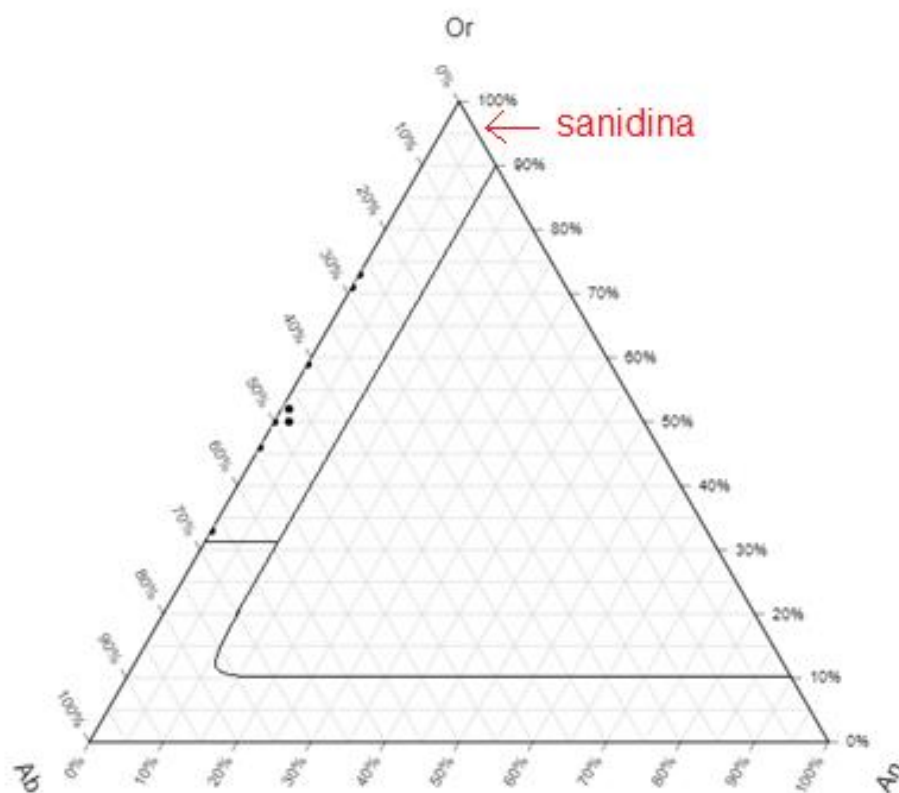


Figura 26: Diagrama ternário de classificação dos feldspatos com as composições representativas.

- *Feldspatoides:*

Foram realizadas análises de química mineral nos feldspatoides, que normalmente ocorrem como cristais cúbicos euédricos de tamanho de até 3 mm com coloração variando entre cinza a incolor. Foram realizadas análises em perfil centro-borda para o estudo da variação composicional ao longo de zonas com diferenças de coloração.

As análises químicas pontuais (tabela 5) indicam que os feldspatoides possuem composição química do grupo da sodalita. A pequena variação composicional observada permite caracterizá-los dentro da solução sólida noseana-hauyna, não sendo observado nenhum padrão de zonação.

Tabela 5: análises representativas de feldspatoides dos fonólitos porfiríticos em perfil centro-borda. (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

<b>Posição no Cristal</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Cl</b>	<b>CaO</b>	<b>Total</b>
Centro	34,37	28,17	9,95	23,64	0,67	0,53	1,57	99,44
Centro	34,74	28,42	9,97	23,06	0,75	0,40	1,66	99,25
Centro	36,23	28,03	7,08	21,92	1,87	0,18	1,00	96,53
Borda	34,67	29,02	7,38	21,40	2,73	0,78	0,65	96,92
Borda	34,61	28,95	7,26	22,49	1,40	0,79	2,05	97,64
Borda	34,26	27,67	9,96	23,51	0,63	0,46	1,55	98,54
Borda	35,30	28,18	7,21	20,92	2,89	0,33	0,92	96,32

- *Granadas:*

Foram realizadas análises nos fenocristais de granada, que frequentemente possuem zonação visível ao microscópio óptico, variando entre tons de castanho escuro e claro. Foram feitos perfis centro-borda com o objetivo de caracterizar a zonação. Com os dados de química mineral (tabela 6) das granadas podemos classificá-las dentro do grupo da andradita, e em função de seu alto teor de TiO<sub>2</sub> são classificados como a variedade melanita (andradita rica em Ti). Além disso, podemos verificar que a zonação ocorre pela variação dos teores de FeO e TiO<sub>2</sub>, que competem na ocupação do sítio octaédrico.

Tabela 6: análises representativas de granada em perfil centro-borda (resultados em percentagem em peso de óxidos).

<b>Posição no Cristal</b>	<b>FeO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Total</b>	<b>Andradita</b>
1- Borda	21,3	5,98	34,67	1,25	3,29	31,12	98,06	43,35
1- Borda	21,5	5,43	34,56	1,18	3,42	31,15	97,66	43,35
1- Centro	22,0	5,16	34,32	1,22	3,66	31,01	97,66	43,35
1- Centro	20,9	5,6	34,54	1,20	3,93	30,88	97,50	43,35
2- Borda	21,6	5,22	34,24	1,12	4,30	30,90	97,79	43,35
2- Borda	21,6	5,8	34,81	1,15	3,22	30,98	97,92	43,35
2- Centro	21,5	5,51	34,65	1,03	3,42	31,10	97,62	43,35
2- Centro	21,5	5,12	34,14	1,14	4,14	31,22	97,62	43,35
3- Borda	21,5	5,67	34,69	1,17	3,40	30,97	97,73	43,35
3- Borda	21,9	5,27	34,23	1,11	3,66	30,97	97,48	43,35
3- Centro	21,7	5,11	34,30	1,12	3,95	31,06	97,54	43,35
3- Centro	21,3	5,35	34,44	1,20	3,57	31,02	97,16	43,35
4- Borda	21,3	5,5	34,37	1,18	3,71	31,20	97,66	43,35
4- Borda	21,7	5,42	34,46	1,18	3,85	31,09	98,11	43,35
4- Centro	21,5	5,43	34,36	1,15	3,55	31,02	97,42	43,35
4- Centro	21,3	5,48	34,46	1,11	3,40	31,33	97,47	43,35

- *Enclave máfico:*

Além da mineralogia primária da rocha e de sua matriz, foram feitas análises pontuais em minerais do enclave máfico que ocorre neste tipo petrográfico. As análises petrográficas e químicas permitiram identificar mica, clinopiroxênio, feldspato alcalino e titanita.

*1) Clinopiroxênios do enclave máfico:*

Foram feitas análises pontuais no clinopiroxênios presentes no enclave máfico e não foram adquiridos perfis centro-borda em função da dificuldade de individualizar os cristais e pela ausência de uma zonação específica a ser estudada. A partir da tabela 7, podemos afirmar que há mais de um tipo químico de piroxênio no enclave, a partir do diagrama de Morimoto (1988) (figura 27) podemos notar que as fases variam

entre composições de augita ( $\text{Ca}_{0.683}\text{Na}_{0.213}$ )( $\text{Fe}^{3+}_{0.221}\text{Fe}^{2+}_{0.185}\text{Mg}_{0.557}$ ) ( $\text{Si}_{0.986}\text{Al}_{0.014}$ ) e diopsídio ( $\text{Ca}_{0.860}\text{Na}_{0.129}$ )( $\text{Fe}^{3+}_{0.222}\text{Fe}^{2+}_{0.212}\text{Mg}_{0.469}$ )( $\text{Si}_{0.897}\text{Al}_{0.103}$ ) devido a variação de CaO.

Tabela 7: análises representativas dos clinopiroxênios do enclave (resultados em Percentagem em peso de óxidos).

Mineral	FeO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Total	Wo	En	Fs
1	13,4	2,77	0,35	52,61	1,09	0,40	11,22	18,07	99,92	41	35	24
2	13,1	2,67	0,54	52,93	0,88	0,43	10,77	18,50	99,88	42	34	24
3	13,2	2,40	0,91	51,94	0,89	0,48	10,34	19,64	99,79	44	32	24
4	13,8	1,76	5,59	47,38	0,59	1,25	8,45	21,20	100,08	48	27	25
5	13,6	2,93	0,46	52,90	1,03	0,42	11,37	17,42	100,10	39	36	25
6	13,2	2,89	0,45	53,11	1,03	0,44	11,05	17,78	100,01	40	35	25
7	12,8	2,66	0,98	52,56	1,03	0,33	11,34	17,78	99,48	40	36	24
8	13,3	2,78	0,44	52,66	1,09	0,45	11,37	17,49	99,67	40	35	25
9	13,4	2,73	0,47	53,13	1,06	0,43	11,56	17,32	100,17	39	36	25
10	13,7	2,92	0,43	52,41	1,12	0,50	11,27	16,93	99,31	38	35	26
11	12,7	2,61	0,40	52,78	1,04	0,40	11,36	18,69	100,04	41	35	24
12	12,5	2,52	0,51	52,55	0,89	0,39	11,03	19,55	99,94	43	34	23

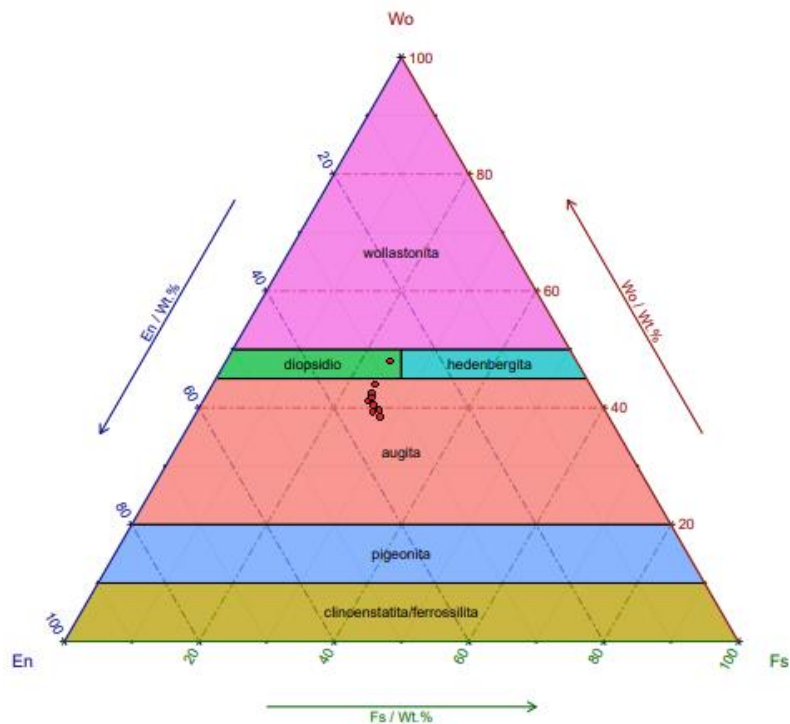


Figura 27: Diagrama ternário dos piroxênios presentes no enclave.

## II) Micas:

A mica presente no enclave ocorre como grandes cristais de até (2cm) e possui pleocroísmo entre castanho escuro e castanho claro. Os dados de química mineral obtidos e apresentados na tabela 8 e no diagrama de Foster (1960) (figura 28) permitem classificá-las como magnésio-biotita.

Tabela 8: análises de micas do enclave (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

Mineral	FeO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Total	Al <sup>VI</sup> +Fe <sup>3++</sup> Ti	Fe <sup>2++</sup> Mn	Mg
1	19.8	2.51	12.39	38.52	2.22	3.14	8.09	10.91	98.27	0.294	1.044	1.759
2	19.9	2.53	12.68	38.00	2.29	3.19	7.87	10.98	98.17	0.242	1.084	1.721
3	19.8	2.55	12.21	38.97	2.22	2.98	8.21	10.99	98.60	0.263	1.073	1.774
4	19.4	2.46	12.31	38.44	2.29	3.07	8.24	10.95	97.91	0.236	1.095	1.798
5	19.5	2.47	12.04	38.63	2.27	3.17	8.08	11.10	97.89	0.224	1.114	1.764
6	19.6	2.40	12.04	38.53	2.21	3.11	8.17	10.91	97.59	0.228	1.115	1.786
7	19.9	2.48	12.07	38.64	2.25	3.12	8.16	10.85	98.13	0.283	1.071	1.776



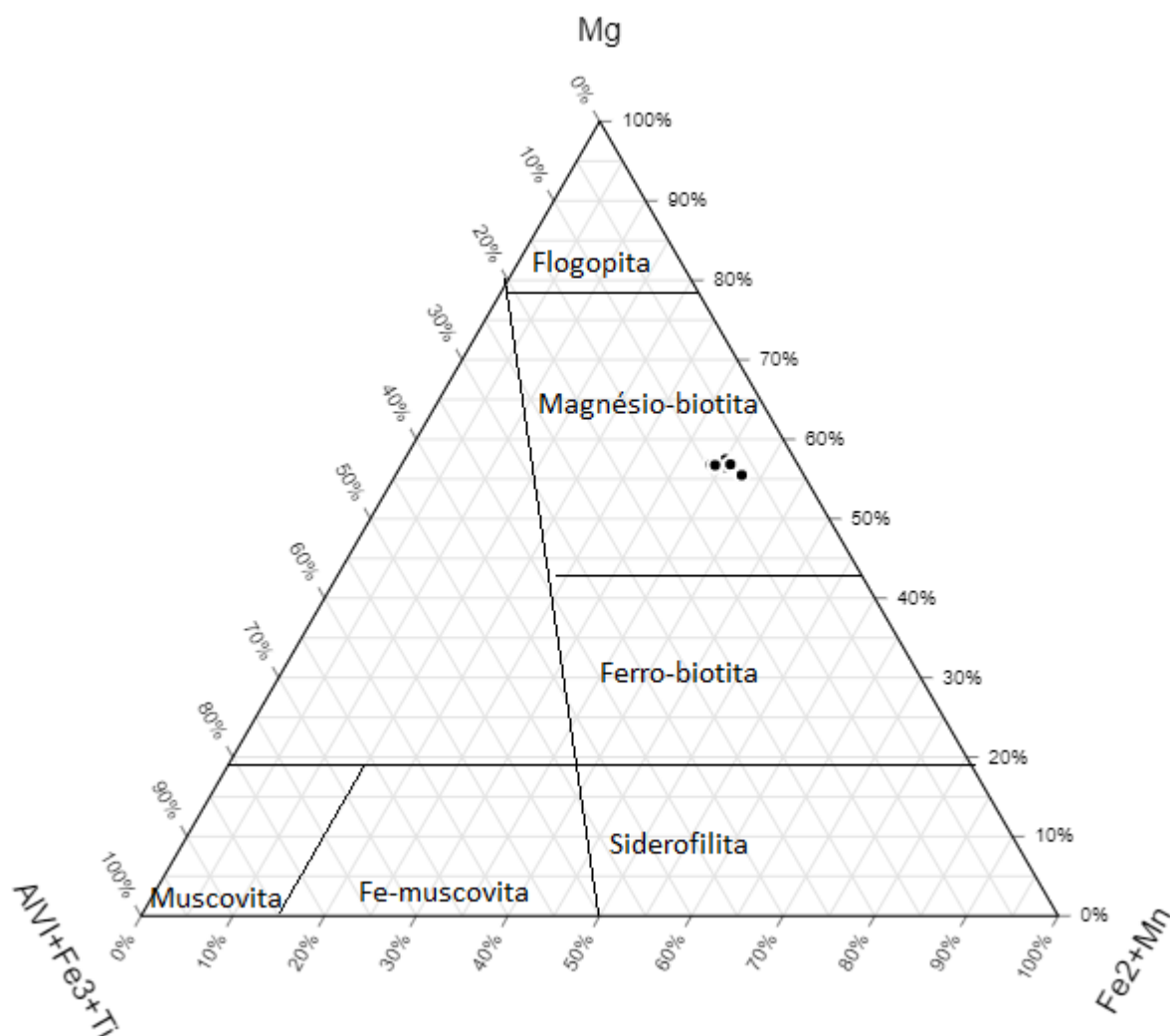


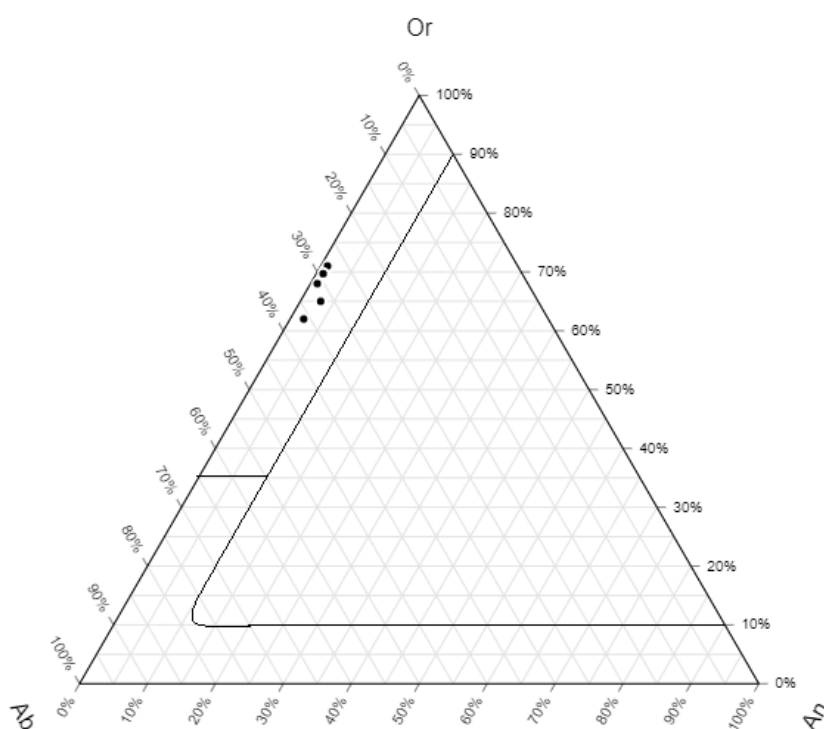
Figura 28: Diagrama de Forster (1960) das biotitas do enclave encontrado nas rochas porfíricas classificadas quimicamente.

### III) Feldspatos:

O feldspato alcalino do enclave não possui uma zonação óptica evidente e ocorre como pequenos cristais no interior do enclave, não tendo contato direto com a rocha hospedeira. As análises químicas (tabela 9) pontuais indicam que o feldspato possui uma composição de sanidina (figura 29) e não possui uma zonação química.

Tabela 9: análises representativas dos feldspatos do enclave (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

Mineral	Na2O	Al2O3	SiO2	K2O	CaO	Total	Or	Ab	An
1	3,15	19,22	63,28	11,57	0,18	97,82	70	29	01
2	3,10	19,05	63,61	11,53	0,14	97,91	70	29	01
3	2,95	18,99	64,05	11,75	0,12	98,52	71	28	01
4	3,20	19,49	62,78	11,21	0,18	97,28	69	29	01
5	3,30	19,13	63,39	10,99	0,15	97,37	68	31	01



Made with TernaryPlot.com

Figura 29: Diagrama ternário de classificação dos feldspatos presentes no enclave.

### 6.3.2 Fonólitos subafíricos

Para as rochas subafíricas foram feitas análises pontuais nos clinopiroxênios encontrados como microfenocristais com intuito de entender os diferentes tipos de composição. Além disso foram feitos perfis centro-borda nos feldspatos alcalinos e análises pontuais nos feldspatoides.

- *Piroxênios:*

Os clinopiroxênios nas rochas subafíricas são encontrados na matriz e raramente como fenocristais. Possuem um fraco pleocroísmo entre verde escuro e verde claro. A partir dos dados de química mineral apresentados na tabela 10, podemos notar que são os clinopiroxênios com um teor mais sódico encontrados nas rochas da SAPC, todavia ainda classificados dentro do diagrama de Morimoto (1988) (figura 30) como augita ou aegerina-augita ( $\text{Ca}_{0.434}\text{Na}_{0.628}$ ) ( $\text{Al}_{0.117}\text{Fe}^{3+}_{0.221}\text{Mg}_{0.187}$ ) ( $\text{Si}_{0.948}\text{Al}_{0.052}$ ) em função do alto teor de Na.

Tabela 10: análises representativas dos clinopiroxênios das rochas afaníticas. (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

Mineral	FeO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	CaO	Total	Wo	En	Fs
1	17,72	10,01	14,31	49,64	1,28	1,05	7,01	102,98	31	06	63
2	18,57	8,36	4,86	48,95	2,31	2,50	10,46	98,10	35	12	53
3	16,41	7,99	12,19	51,12	1,47	1,40	7,91	99,72	33	09	58
4	16,88	8,30	12,80	48,94	1,64	1,34	9,72	101,23	38	07	55

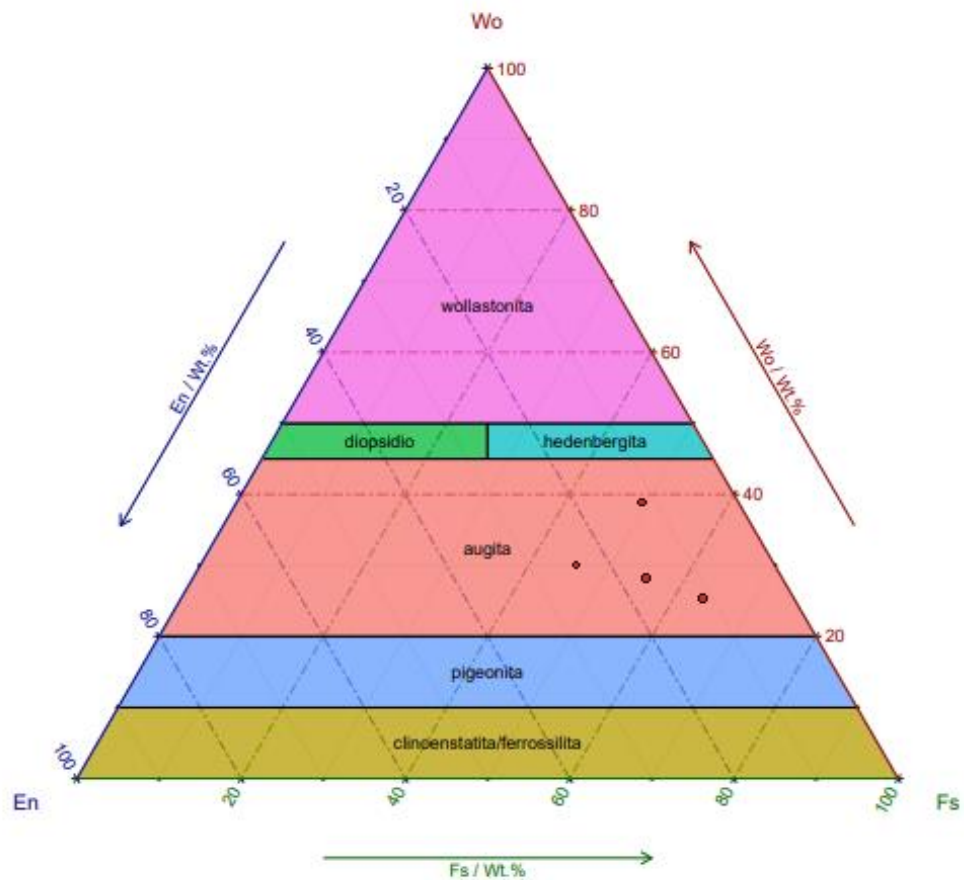


Figura 30: Diagrama ternário dos clinopiroxênios presentes das rochas subafíricas.

- *Feldspatos alcalinos:*

As análises químicas pontuais (tabela 11) indicam que os feldspatos alcalinos das rochas subafíricas possuem composição que mostra uma grande variação entre teores de Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O, todavia ao classificá-los quimicamente no diagrama ternário dos feldspatos (figura 31) notamos que essa variação não é suficiente para serem nomeados como anortoclásios, sendo todos classificados como sanidina.

Tabela 11: análises representativas dos feldspatos alcalinos das rochas afaníticas (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

Mineral	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Total	Or	Ab	An
1	5,60	19,11	64,28	10,13	0,03	99,84	55	45	00
2	1,69	18,14	64,39	14,85	0,01	99,45	85	15	00
3	3,09	18,54	64,72	12,82	0,06	99,56	72	26	02
4	4,93	18,91	65,52	10,60	0,09	100,34	58	41	01
5	6,68	20,44	62,95	8,64	0,00	99,47	54	46	00
6	6,05	20,64	62,33	9,19	0,00	98,94	50	50	00

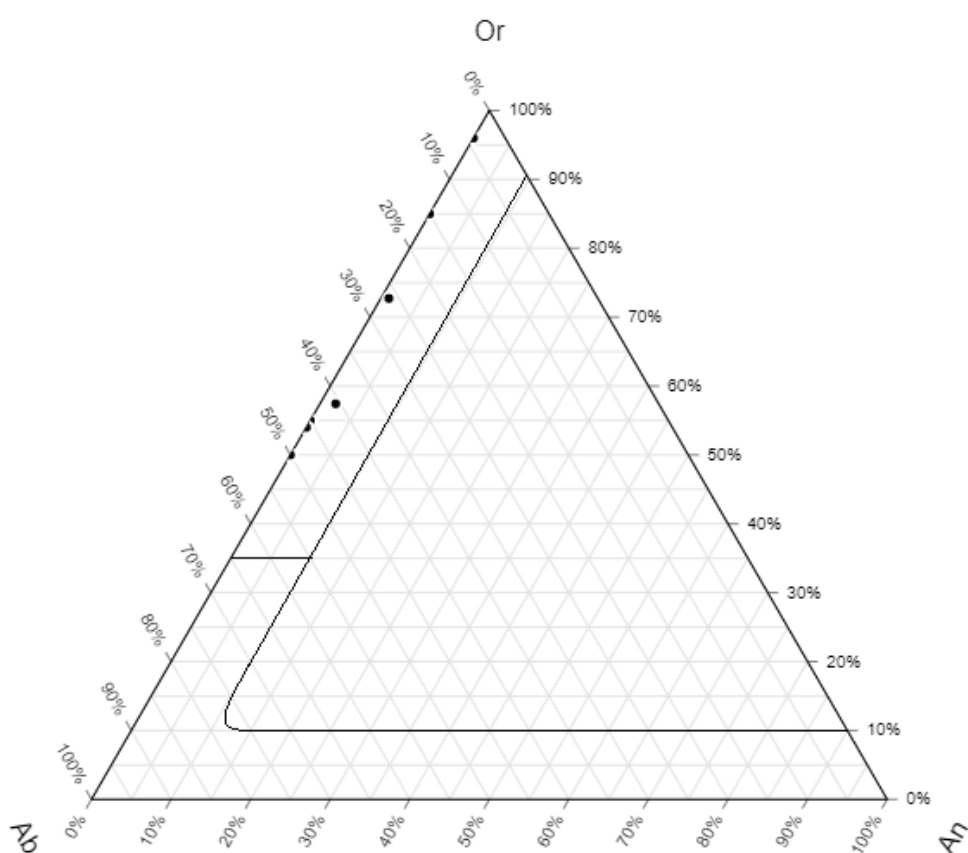


Figura 31: Diagrama ternário dos feldspatos alcalinos presentes das rochas afaníticas.

- *Feldspatoides:*

Na tabela 12, temos as análises químicas dos feldspatoides das rochas subafíricas. Semelhantes aos das rochas porfíricas estes normalmente ocorrem como cristais cúbicos euédricos de tamanho de até 3 mm com coloração cinza a incolor. As análises pontuais indicam que os feldspatoides possuem uma composição química do grupo da sodalita, variando composicionalmente entre os membros noseana-hauyna sem um padrão de zonação.

Tabela 12: análises representativas dos feldspatóides das rochas afaníticas. (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

<b>Mineral</b>	<b>Cl</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>Total</b>
Foid 1 centro	0,56	6,67	33,50	28,84	8,95	13,22	2,49	94,23
Foid 1 borda	0,47	5,97	33,89	29,70	10,39	13,28	1,04	94,73
Foid 1 borda	0,62	6,75	33,64	30,90	10,33	14,57	1,00	97,80
Foid 2 centro	0,13	6,34	34,89	31,35	10,74	14,81	0,02	97,86
Foid 2 centro	0,03	5,95	35,63	30,81	10,01	13,85	1,03	98,05
Foid 2 borda	0,13	6,60	34,21	30,20	10,65	13,91	0,99	97,11
Foid 2 borda	0,02	6,62	33,91	30,99	11,41	14,42	0,06	97,44

### 6.3.3 Lamprófiro

No Lamprófiro, foram realizadas análises de química mineral em perfil centro-borda dos clinopiroxênios presentes, além disso foram realizadas análises pontuais nas olivinas e nas micas que ocorrem como fenocristais.

- *Piroxênios:*

No lamprófiro, foram feitas análises em clinopiroxênios com intuito de investigar de forma mais minuciosa os tipos encontrados, sendo eles: I) piroxênios zonados com centro verde e borda incolor, II) piroxênios homogêneos incolores e III) piroxênios zonados com centro incolor e borda verde zonada oscilatoriamente; para

isso foram realizados perfis centro-borda nos cristais (podemos observar os tipos nas figuras 32, 33 e 34).

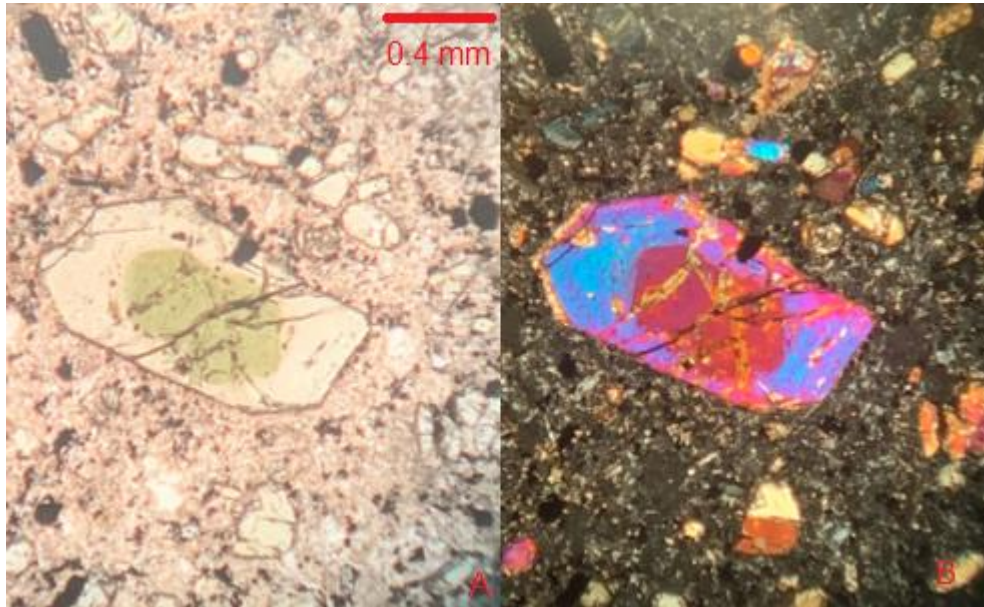


Figura 32: A e B: Fotomicrografia de clinopiroxênio com núcleo verde e borda incolor em lamprófiro do tipo I; (A-PP; B-PC)

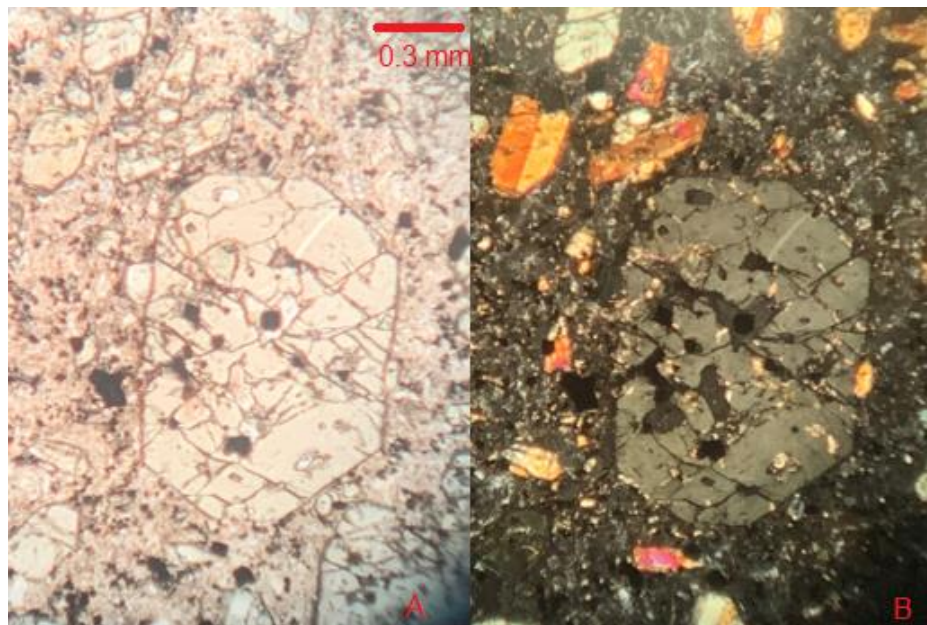


Figura 34: Fotomicrografia de clinopiroxênio homogêneo sem zonação em lamprófiro do tipo II; (A-PP; B-PC).

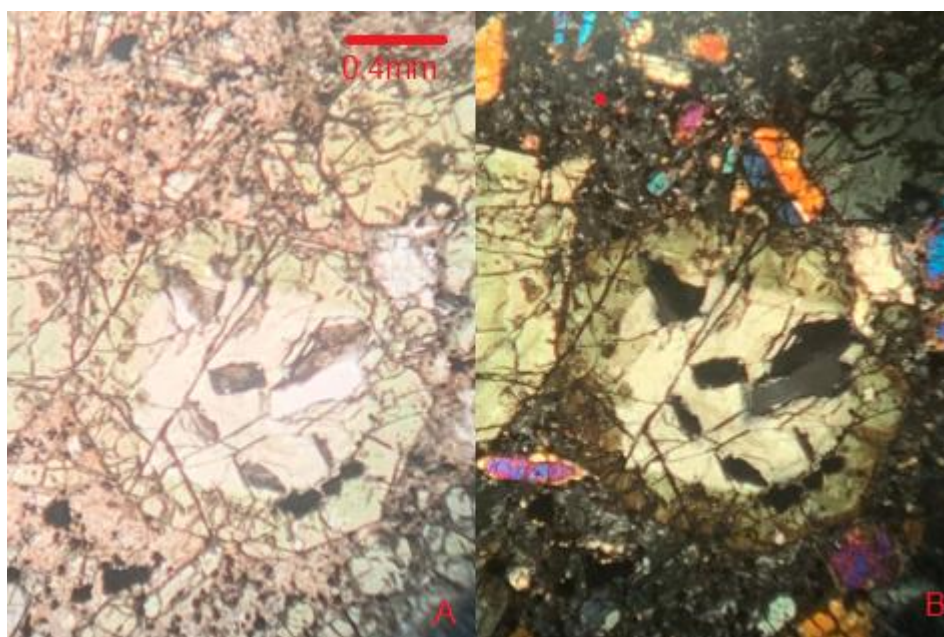


Figura 33: Fotomicrografia de clinopiroxênio com núcleo incolor e borda verde em lamprófiro do tipo III; (A-PP; B-PC)

*1) Piroxênios com centro verde e borda incolor:*

A primeira população de clinopiroxênios é caracterizada por possuir um centro de coloração verde com texturas de reabsorção no núcleo e com uma zonação óptica concêntrica oscilatória na sua borda incolor.

A partir da tabela 12 e da classificação no diagrama de Morimoto (1988) (figura 35), podemos observar que as zonações presentes na população tratam-se de zonações inversas – que migram da fase mais rica em Fe  $(\text{Ca}_{0.898}\text{Na}_{0.108})(\text{Fe}^{3+}_{0.291}\text{Fe}^{2+}_{0.248}\text{Mg}_{0.355})(\text{Si}_{0.848}\text{Al}_{0.152})$  para mais rica em Mg  $(\text{Ca}_{0.923}\text{Na}_{0.057})(\text{Fe}^{3+}_{0.142}\text{Fe}^{2+}_{0.103}\text{Mg}_{0.667})(\text{Si}_{0.891}\text{Al}_{0.109})$ .



Tabela 12: análises representativas dos clinopiroxênios com centro verde e borda incolor do lamprófiro. (resultados em porcentagem em peso dos óxidos).

Posição no Mineral	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	FeO	MnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total	Wo	En	Fs
Centro	1,36	1,46	16,76	0,74	21,90	44,32	6,15	7,68	100,42	50	20	30
Centro	1,45	1,46	16,61	0,76	21,52	44,41	6,41	7,43	100,05	50	20	30
Centro	1,41	1,50	16,55	0,74	21,58	44,22	6,27	7,37	99,66	50	20	30
Centro	1,38	1,28	16,71	0,72	21,93	44,05	6,28	7,48	99,88	50	20	30
Borda	1,52	0,54	6,89	0,26	23,80	50,10	13,44	3,74	100,29	50	39	11
Borda	1,91	0,96	8,28	0,33	23,10	48,07	12,28	5,69	100,69	50	36	14
Borda	1,89	0,79	7,99	0,25	23,25	48,07	12,38	5,64	100,37	50	37	13
Borda	1,53	0,71	7,89	0,24	23,51	48,78	12,61	4,88	100,19	50	37	13
Borda	1,72	0,70	8,13	0,26	23,48	48,13	12,11	5,37	99,89	50	36	14

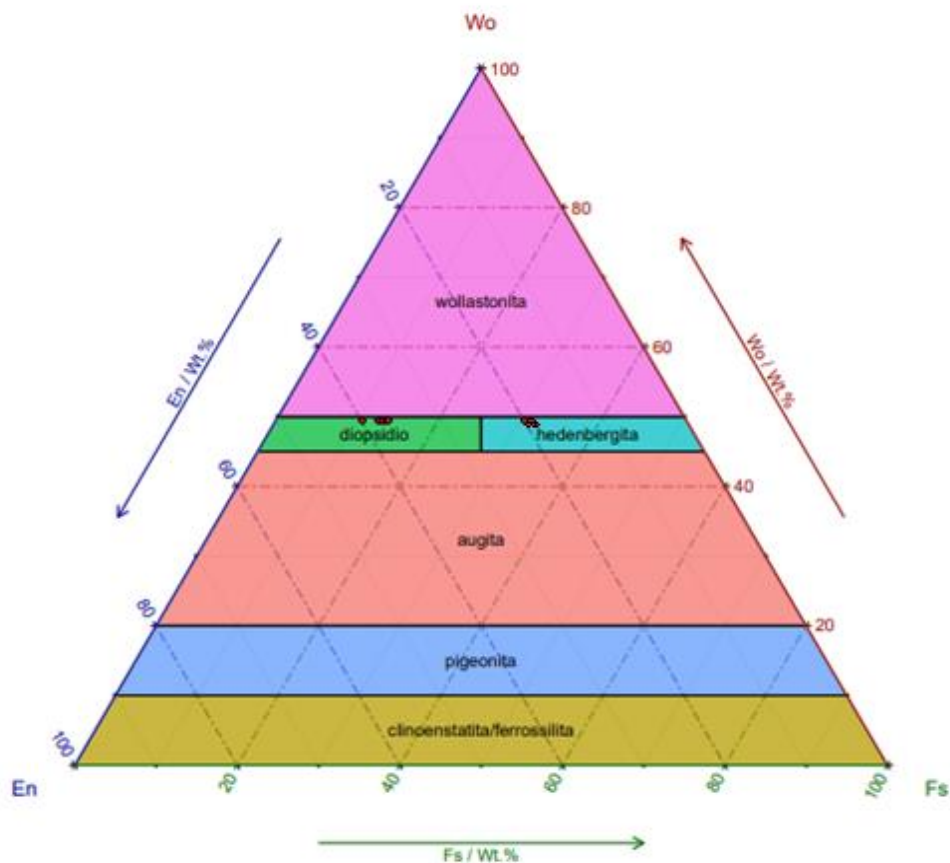


Figura 35: Diagrama ternário representativo dos clinopiroxênios de centro verde com borda incolor presentes no lamprófiro.

*II) Piroxênios homogêneos incolores:*

A segunda população de clinopiroxênios é caracterizada por ser incolor e homogênea sem nenhuma zonação óptica.

A partir da tabela 13 e da classificação no diagrama de Morimoto (1988) (figura 36) e a fase está em equilíbrio com o magma por não possuir uma zonação química. No diagrama podemos classificá-los como diopsídio e sua fórmula mineral é representada por  $(Ca_{0.920}Na_{0.064})(Fe^{3+}_{0.119}Fe^{2+}_{0.166}Mg_{0.652})(Si_{0.928}Al_{0.072})$ .

Tabela 13: análises de microsonda eletrônica em óxido dos clinopiroxênios homogêneos incolores do lamprófito (resultados em porcentagem em peso).

<b>Posição no Mineral</b>	<b>TiO2</b>	<b>Na2O</b>	<b>FeO</b>	<b>MnO</b>	<b>CaO</b>	<b>SiO2</b>	<b>MgO</b>	<b>Al2O3</b>	<b>Total</b>	<b>Wo</b>	<b>En</b>	<b>Fs</b>
Centro	1,13	0,89	9,33	0,21	23,21	50,18	12,04	3,86	100,83	49	35	16
Centro	1,29	0,96	9,60	0,21	23,04	49,15	11,65	4,57	100,56	50	34	16
Centro	1,94	0,69	7,66	0,17	23,77	48,06	12,63	5,34	100,34	50	37	13
Centro	2,01	0,67	7,52	0,16	23,77	47,77	12,61	5,51	100,10	50	37	13
Borda	2,15	0,73	7,86	0,28	23,48	47,07	11,90	6,42	99,90	50	36	14
Borda	2,93	0,87	8,28	0,27	23,38	45,60	11,24	7,29	99,88	51	35	15
Borda	2,21	0,66	8,00	0,18	23,68	47,48	12,36	5,74	100,31	50	37	13
Borda	1,56	0,99	6,65	0,29	21,67	49,31	11,96	6,06	98,60	50	38	12
Borda	1,59	1,00	6,73	0,28	21,56	49,03	12,03	6,09	98,37	49	38	13
Borda	2,02	0,66	7,90	0,16	23,76	47,71	12,36	5,71	100,37	50	37	13

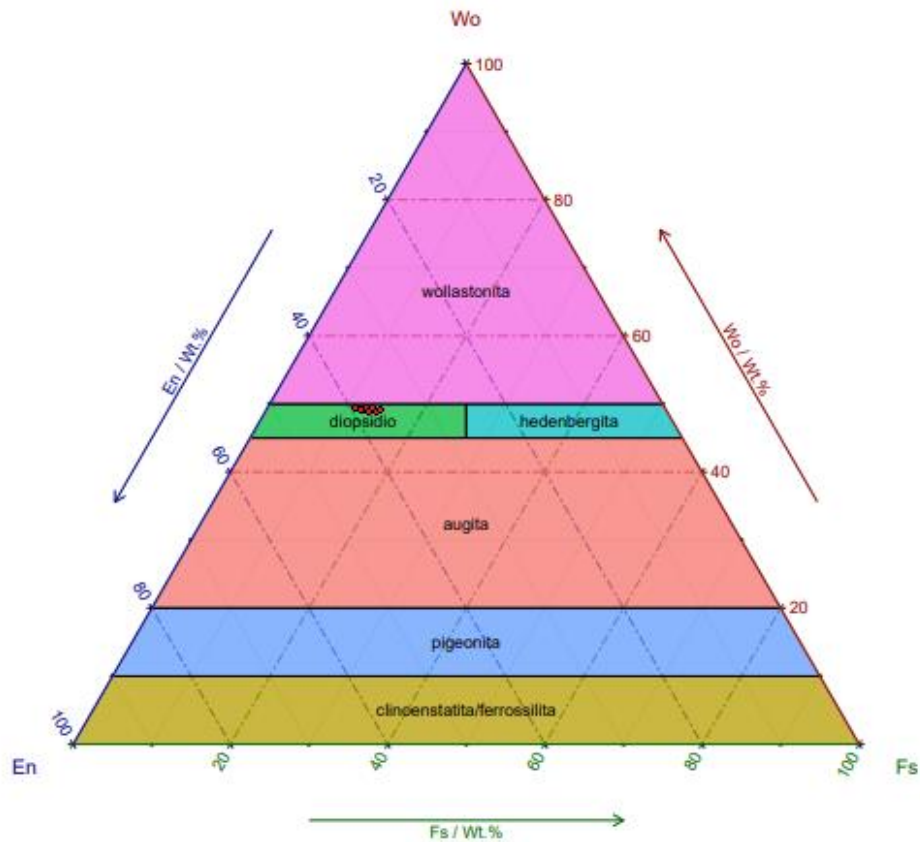


Figura 36: Diagrama ternário dos clinopiroxênios homogêneos incolores presentes no lamprófiro.

### III) Piroxênios com centro incolor e borda verde:

A terceira população de clinopiroxênios é caracterizada por possuir um núcleo incolor e sem zonação, e bordas de coloração verde com zonações concêntricas.

A partir da tabela 14 e da classificação no diagrama de Morimoto (1988) - figura 37 - podemos observar que as composições químicas são ricas em Mg ( $\text{Ca}_{0.935}\text{Na}_{0.040}(\text{Fe}^{3+}_{0.102}\text{Fe}^{2+}_{0.090}\text{Mg}_{0.737})(\text{Si}_{0.917}\text{Al}_{0.083})$ ) e a fase está em desequilíbrio com o magma por possuir uma zonação óptica, todavia ao observarmos a química mineral vemos que não há uma zonação química suficiente para mudança na classificação do cristal, podemos classificá-lo todo como diopsídio.

Tabela 14: Análises de microsonda eletrônica em óxido dos clinopiroxênios com centro incolor e borda verde do lamprófiro (resultados em percentagem em peso).

Posição no Mineral	TiO2	Na2O	FeO	MnO	CaO	SiO2	MgO	Al2O3	Total	Wo	En	Fs
Centro	1,30	0,56	6,50	0,16	23,81	50,36	13,89	4,09	100,65	49	40	11
Centro	1,37	0,60	6,48	0,09	23,82	50,25	13,75	4,25	100,61	49	40	11
Centro	1,33	0,64	6,48	0,10	23,77	49,76	13,72	4,32	100,14	50	39	11
Centro	1,30	0,68	6,63	0,12	23,83	50,21	13,92	4,11	100,80	49	40	11
Centro	1,28	0,56	6,33	0,10	23,78	50,02	13,90	4,58	100,65	50	40	10
Centro	1,09	0,60	5,88	0,11	23,59	50,30	14,31	4,73	100,62	49	41	10
Borda	2,44	0,71	9,18	0,23	23,32	46,15	11,23	6,83	100,09	50	34	16
Borda	2,03	0,65	7,74	0,17	23,89	48,11	12,52	5,69	100,80	50	37	13
Borda	2,10	0,62	8,16	0,19	23,91	47,53	12,38	5,66	100,56	50	36	14
Borda	1,83	0,78	7,66	0,23	23,39	47,83	12,33	5,80	99,97	50	37	13

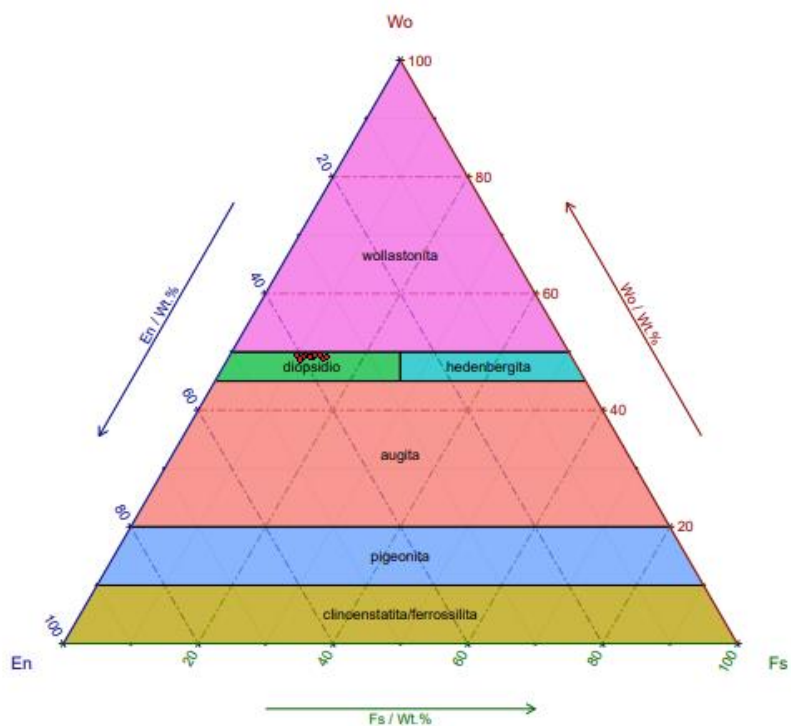


Figura 37: Diagrama ternário representativo dos clinopiroxênios com centro incolor borda verde presentes no lamprófiro.

- *Micas:*

As micas presentes no lamprófiro ocorrem como fenocristais com até (2cm) e possuem pleocroísmo entre castanho escuro e claro. A partir dos dados de química mineral obtidos na tabela 15 e na classificação no diagrama de Foster (1960) (figura 38) podemos quimicamente classificá-las como magnésio-biotitas.

Tabela 15: análises representativas das micas do lamprófiro (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

<b>Mineral</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>FeO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Total</b>	<b>Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti</b>	<b>Fe<sup>2+</sup>+Mn</b>	<b>Mg</b>
1	9,16	3,26	0,73	9,15	37,34	19,08	15,47	94,27	0,683	0,361	2,101
2	8,05	5,04	1,00	11,55	35,45	15,79	15,40	92,44	0,641	0,534	1,804
5	9,11	3,28	0,81	9,62	37,15	18,48	15,50	94,09	0,550	0,389	2,403
6	8,88	3,62	0,81	10,95	36,86	17,65	15,69	94,57	0,582	0,462	1,951
8	7,92	6,30	0,84	12,44	34,54	14,35	15,41	92,09	0,605	0,664	1,656
9	7,76	6,13	0,99	12,85	34,60	14,58	15,68	92,82	0,656	0,640	1,680
10	7,88	5,49	0,96	12,28	35,02	15,22	15,62	92,59	0,651	0,588	1,745

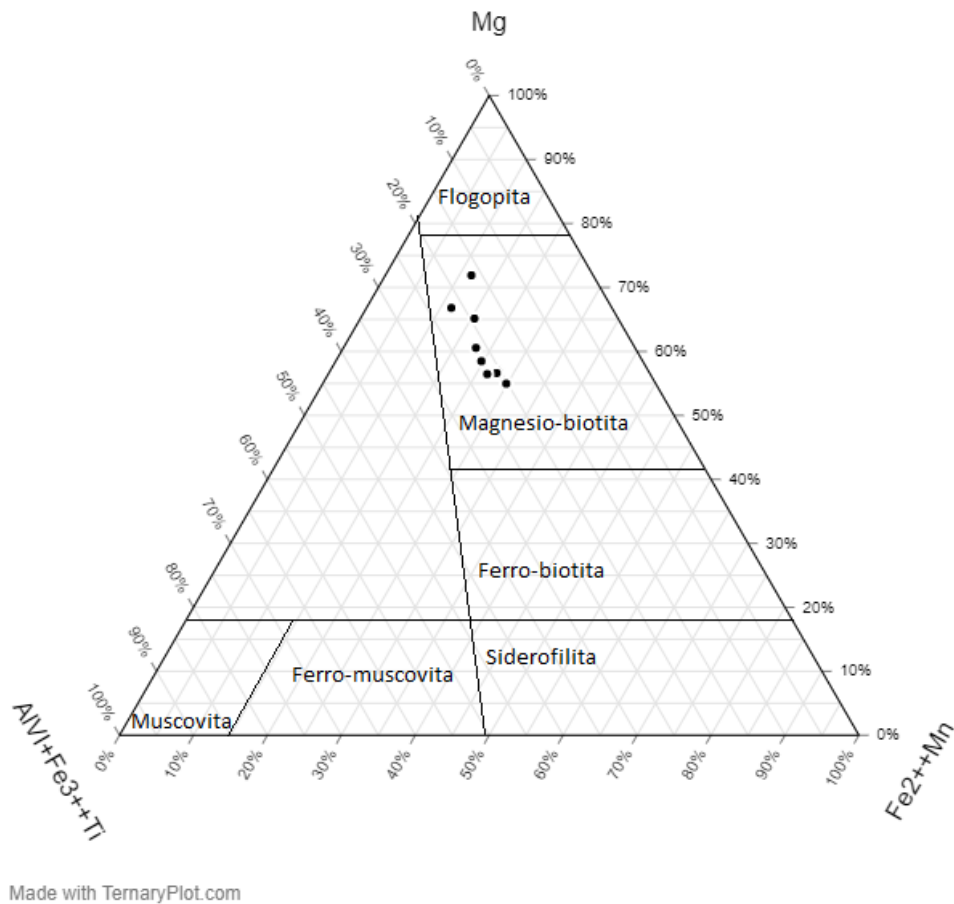


Figura 38: Diagrama ternário de Forster (1960) de classificação das micas presentes no lamprófiro.

- *Olivinas:*

A olivina é um mineral raro nesta rocha, bastante fraturada e com baixo grau de alteração intempérica. As análises pontuais de microsonda eletrônica (tabela 15) mostram que as olivinas presentes no lamprófiro possuem um teor de Fo próximo a 90, sendo então classificadas como forsteritas.

Tabela 15: análises representativas das olivinas do lamprófiro (resultados em percentagem em peso dos óxidos).

Mineral	FeO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Total	Fosterita (Fo)	Faialita (Fa)
1	11,58	39,91	46,56	98,51	87	13
1	8,96	41,06	49,40	99,74	90	10
1	8,93	40,93	48,87	98,97	90	10
1	8,09	41,92	50,14	100,40	92	08
2	8,04	41,94	50,43	100,69	92	08
2	8,17	41,45	50,09	99,90	92	08
2	8,07	41,13	49,73	99,18	92	08
2	8,29	41,46	49,95	99,91	91	09
2	8,44	42,20	50,20	101,07	91	09
2	9,51	40,91	48,40	99,20	90	10

#### 6.4 Geoquímica de rocha total

Foram utilizadas as análises químicas do trabalho de da Silva (2018) (anexo 1) para a confecção de novos diagramas geoquímicos que não haviam sido trabalhados ainda na área. Estes novos diagramas além do TAS (Le Bas et al. 1987 – figura 39) e dos diagramas tipo-Harker são: diagrama R1xR2 (De La Roche et al. 1980 - figura 40), diagrama de Zr/TiO<sub>2</sub> vs SiO<sub>2</sub> (Winchester & Floyd 1977 – figura 41) e diagramas de alcalinidade e peralcalinidade (molar Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O – figura 42).

Além desses diagramas, foi calculada a norma CIPW e analisados os dados dos elementos traço para considerar uma possível ideia de fonte do magmatismo, principalmente em relação aos teores de Y e Nb – elementos com alto K<sub>d</sub> em granadas – e em relação aos elementos móveis como o K, o qual tende a se concentrar no líquido em baixas taxas fusões mantélicas.

A partir do diagrama TAS (figura 39) podemos classificar quimicamente os fonolitos subafíricos como os mais diferenciados na suíte, acompanhados logo após pelos fonolitos porfiríticos, que variam composicionalmente de tefri-fonolitos a fonolitos e o lamprófiro, que se classifica quimicamente como um tefrito/basanito. As ocorrências seguem o *trend* geoquímico das rochas alcalinas subsaturadas em sílica e se comportam de maneira onde a rocha mais primitiva - tefrito/basanito – se diferencia para as rochas porfiríticas até as rochas afaníticas como da Silva (2018)

havia

sugerido.

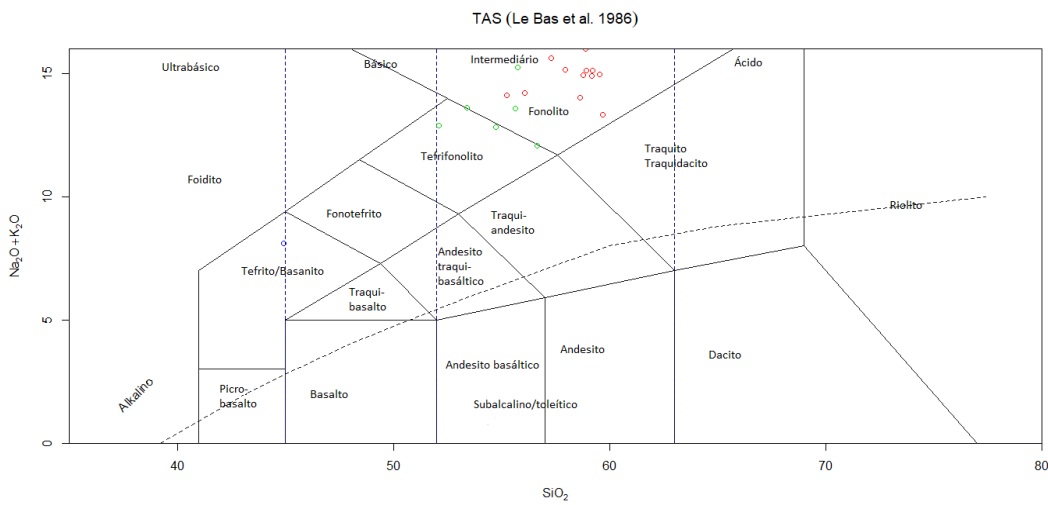


Figura 39: Diagrama TAS (Le Bas et al. 1986) gerados pelo autor com os dados produzidos por da Silva (2018). Fonólitos subaféricos - círculos vermelhos, fonólitos porfíricos - círculos verdes, lamprófiro - círculo azul.

O diagrama R1 x R2 (figura 40) classifica as rochas do mesmo modo, todavia com algumas diferenças: exclui totalmente os fonólitos porfíricos (círculos verdes) de serem traqui-fonólitos, classifica o lamprófiro como um tefrito e separa mais ainda a direnciação na suíte colocando os fonólitos aféricos (círculos vermelhos) em uma posição de maior diferenciação em relação as rochas mais porfíricas.

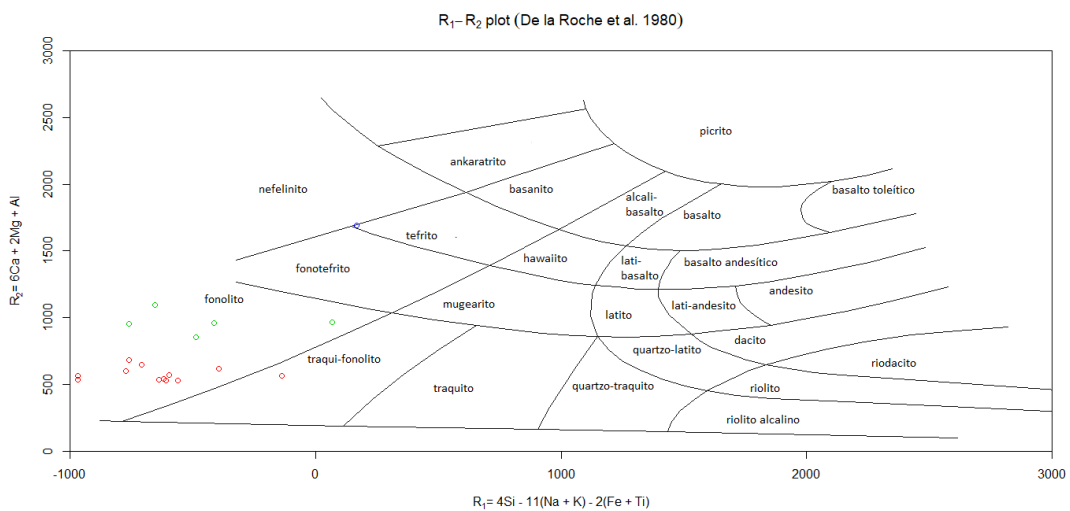




Figura 40: Diagrama R1 x R2 (De La Roche et al. 1980) gerados pelo autor com os dados produzidos por Silva (2018).

No diagrama de Winchester e Floyd (1977) – figura 41 – novamente podemos notar a diferenciação magmática na suíte através da concentração do Zr e do aumento do conteúdo de SiO<sub>2</sub> no magma. Podemos observar que há o aumento nas concentrações de TiO<sub>2</sub> e SiO<sub>2</sub> nas fases mais diferenciadas e que existe um grande *gap* entre as fases mais primitivas e as mais diferenciadas, enquanto a diferença entre esses elementos nas porções mais diferenciadas é menos significativa, porém ainda presente.

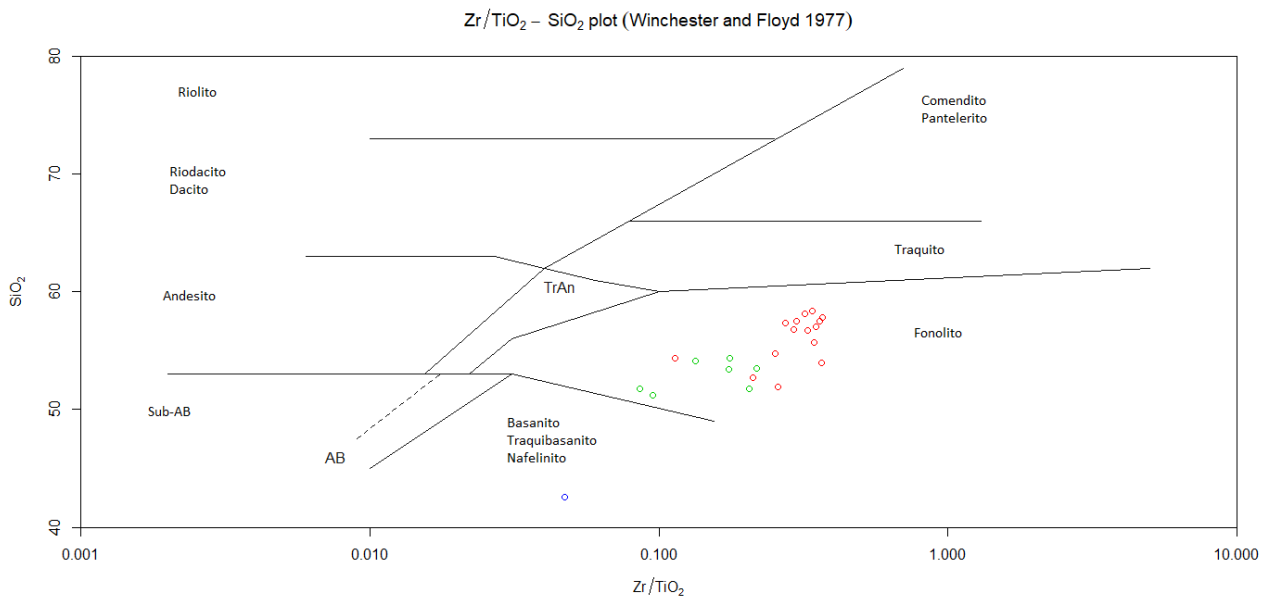


Figura 41: Diagrama Zr/TiO<sub>2</sub> vs SiO<sub>2</sub> (Winchester & Floyd 1977) gerados pelo autor com os dados produzidos por Silva (2018).

A partir do diagrama ternário  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$  (figura 42) podemos classificar a suíte como uma suíte metaluminosa sódica.

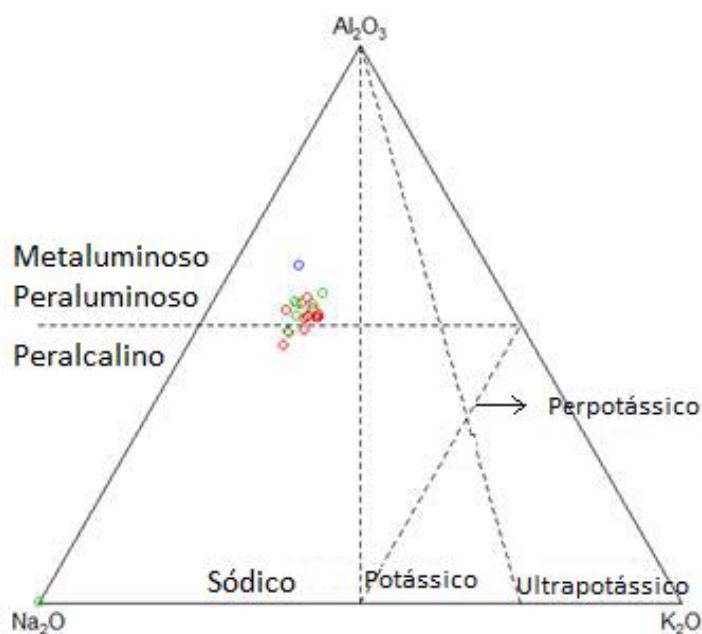


Figura 42: Diagrama ternário  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$  construído os dados de da Silva (2018).

O diagrama de Shand (1943) apresenta a relação entre os álcalis e o teor de alumínio nas amostras, sendo assim permite determinar que nenhum dos corpos da suíte é peralcalinos e que a maioria das amostras plotam no campo dos metaluminosos, todavia duas ocorrências ocorrem plotam como peraluminosas – entretanto isso deve ocorrer devido alguma contaminação crustal no processo ou devido alteração da amostra usada.

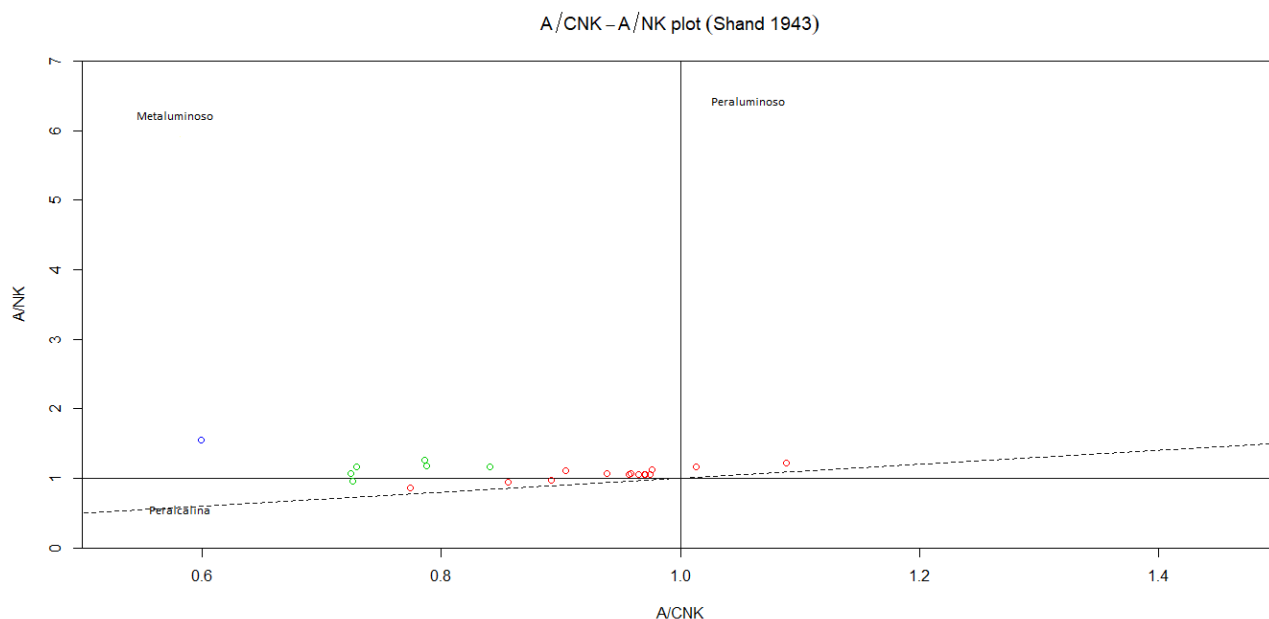


Figura 43: Diagrama ternário A/NK vs A/CNK (Shand 1943) produzido pelo autor a partir dos dados de Silva (2018).

#### 6.4.1 Diagramas tipo-Harker dos elementos maiores:

Os diagramas tipo-Harker permitem avaliar o comportamento dos elementos em relação a um elemento que seja um indicativo da diferenciação, neste caso foram utilizados os teores de sílica que há nas rochas. Com isso, é possível obter alguns parâmetros como: quais elementos se concentram a partir da cristalização fracionada, ou seja, quando há a diferenciação magmática, o elemento se concentra no líquido diferenciado e não nos minerais formados.

Como podemos observar nas figuras com os diagramas de Ti, Fe, Mg e Ca (figuras 44, 45, 46 e 47), quanto maior é o fracionamento menor é a sua concentração no líquido, sugerindo que nos diferentes tipos de rocha de fato houve o fracionamento de um tipo petrográfico para o outro. Por outro lado, podemos observar os gráficos de Na, K e Al (figuras 48, 49 e 50) onde há uma relação inversa destes elementos concentrados nos tipos mais diferenciados corroborando também com a ideia do fracionamento entre os três tipos petrográficos.

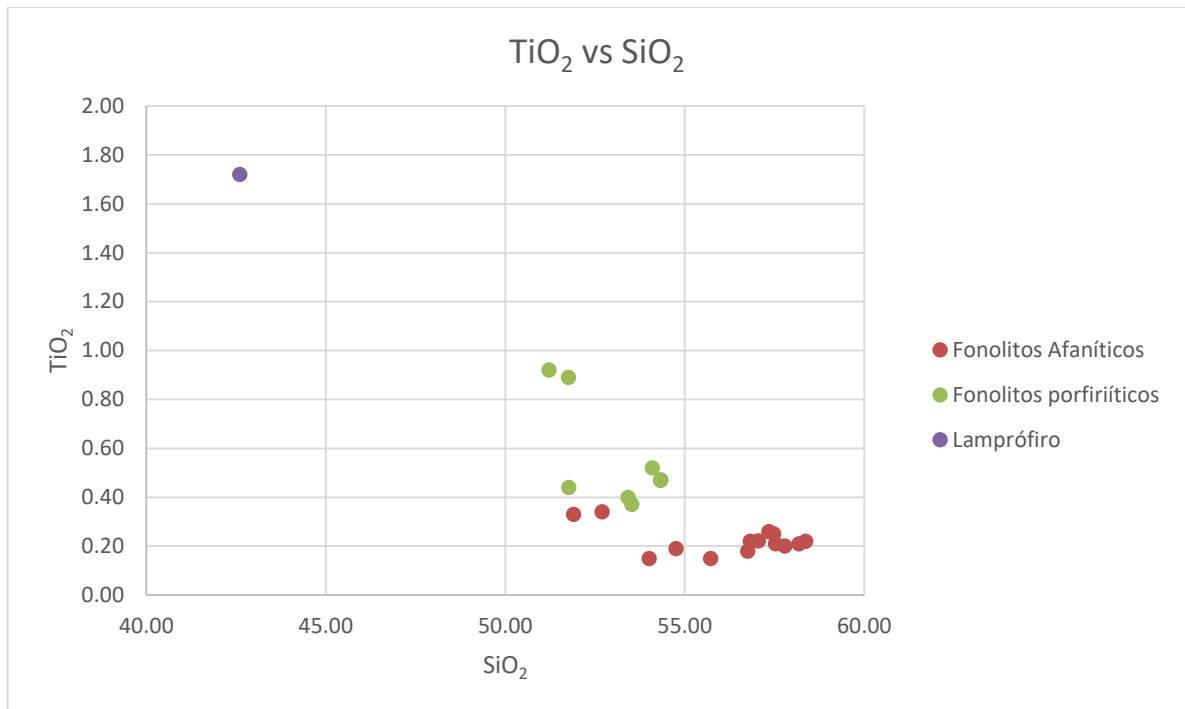


Figura 44: Diagrama tipo-Harker de  $\text{TiO}_2$  vs  $\text{SiO}_2$  a partir dos dados de Silva 2018.

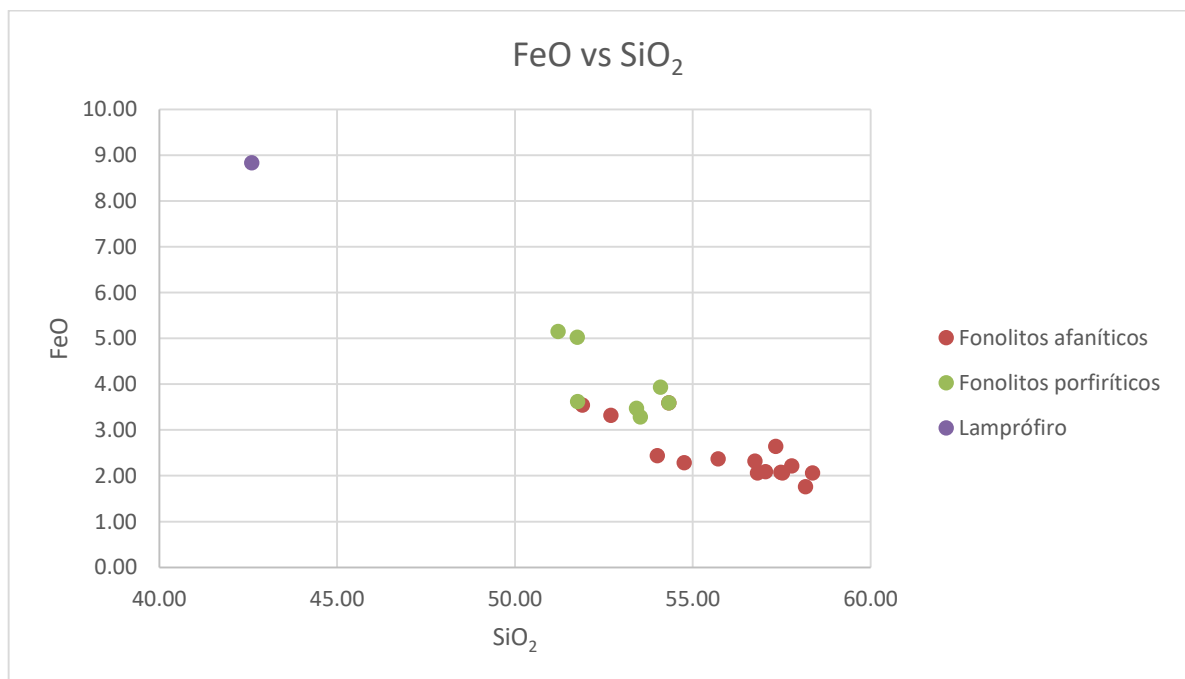


Figura 45: Diagrama tipo-Harker de  $\text{FeO}$  vs  $\text{SiO}_2$  a partir dos dados de Silva 2018.

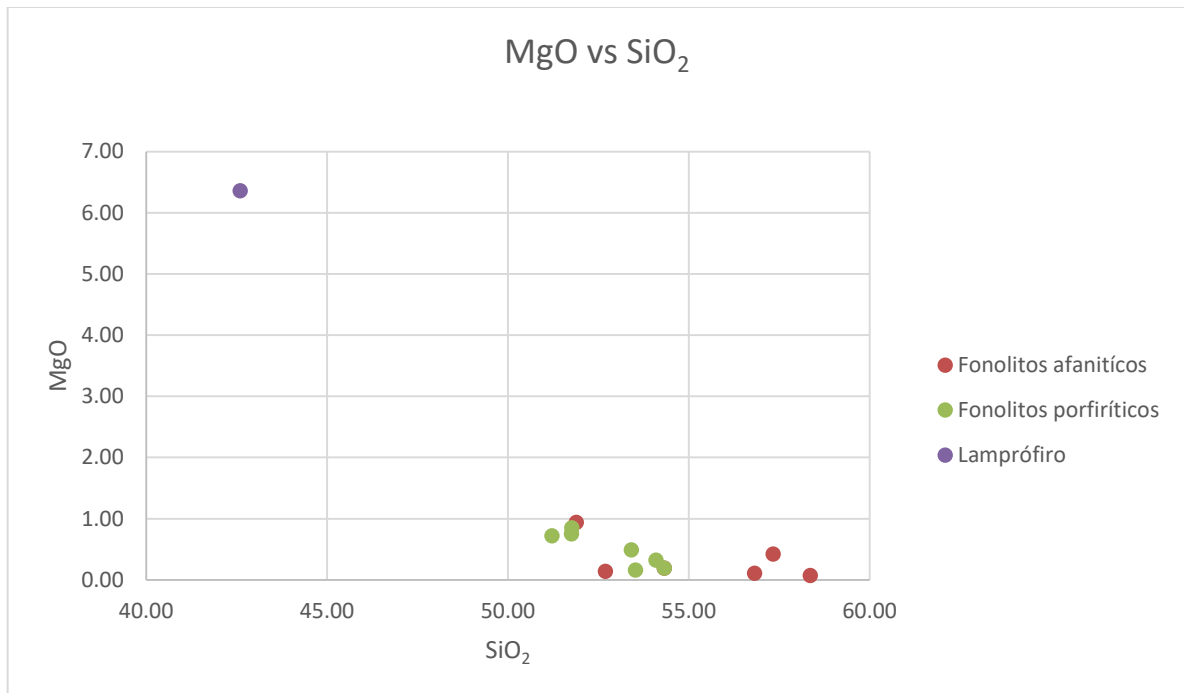


Figura 46: Diagrama tipo-Harker de MgO vs SiO<sub>2</sub> a partir dos dados de Silva 2018.

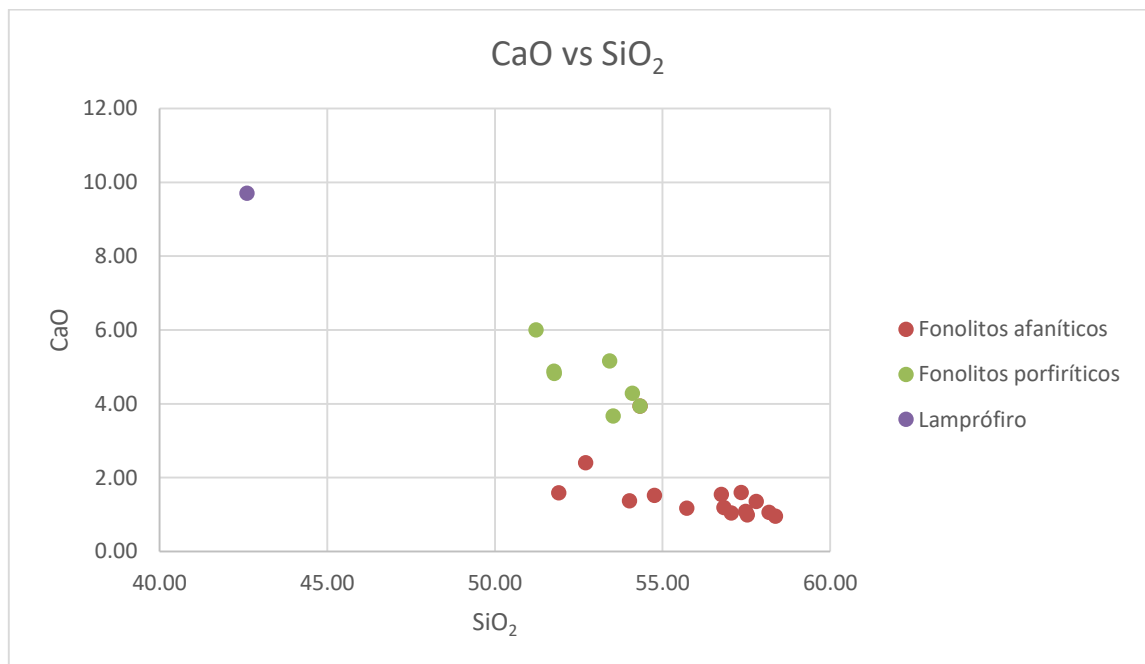


Figura 47: Diagrama tipo-Harker de CaO vs SiO<sub>2</sub> a partir dos dados de da Silva 2018.

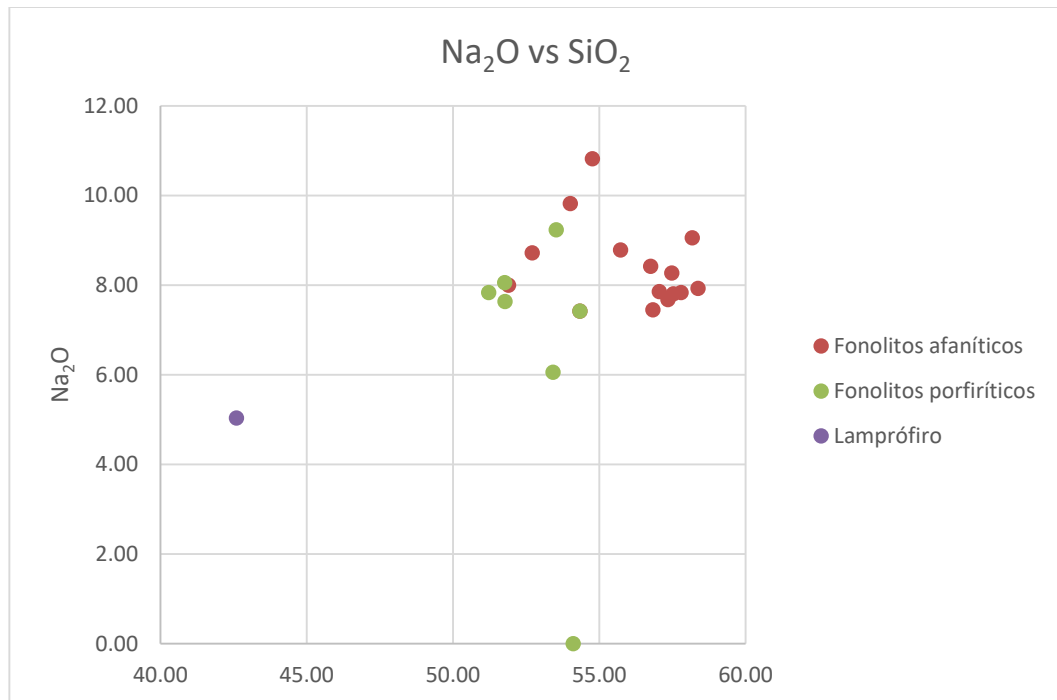


Figura 48: Diagrama tipo-Harker de  $\text{Na}_2\text{O}$  vs  $\text{SiO}_2$  a partir dos dados de da Silva 2018.

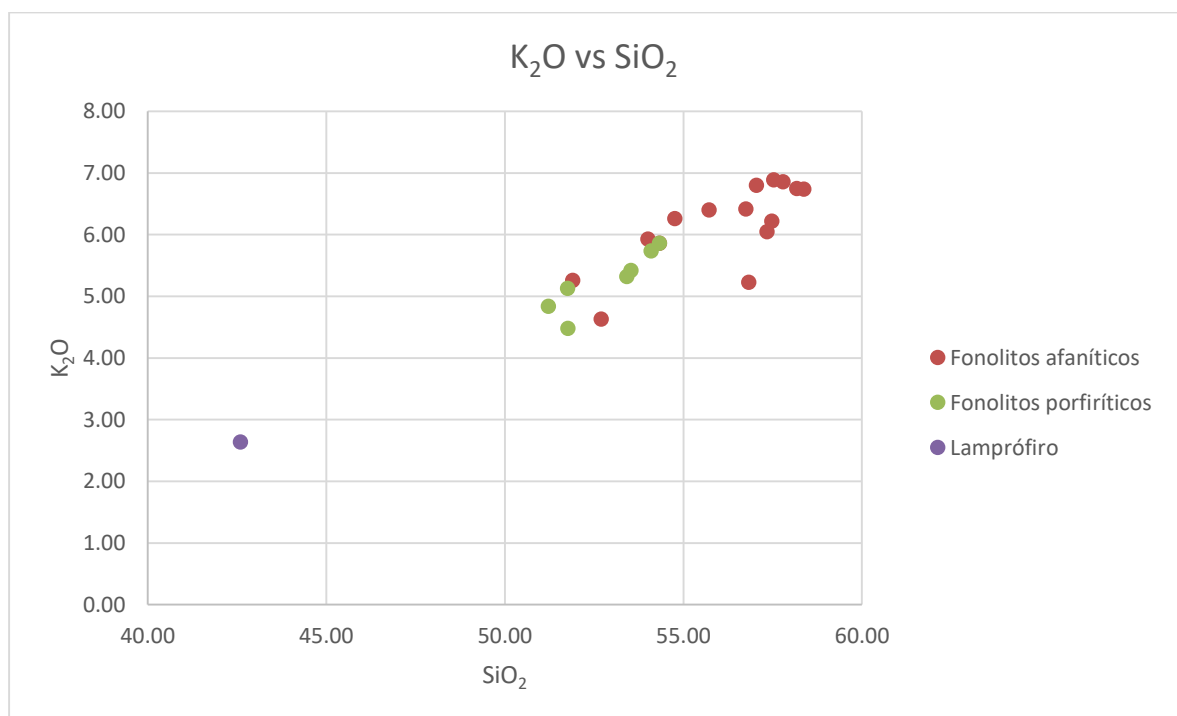


Figura 49: Diagrama tipo-Harker de  $\text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{SiO}_2$  a partir dos dados de da Silva 2018.

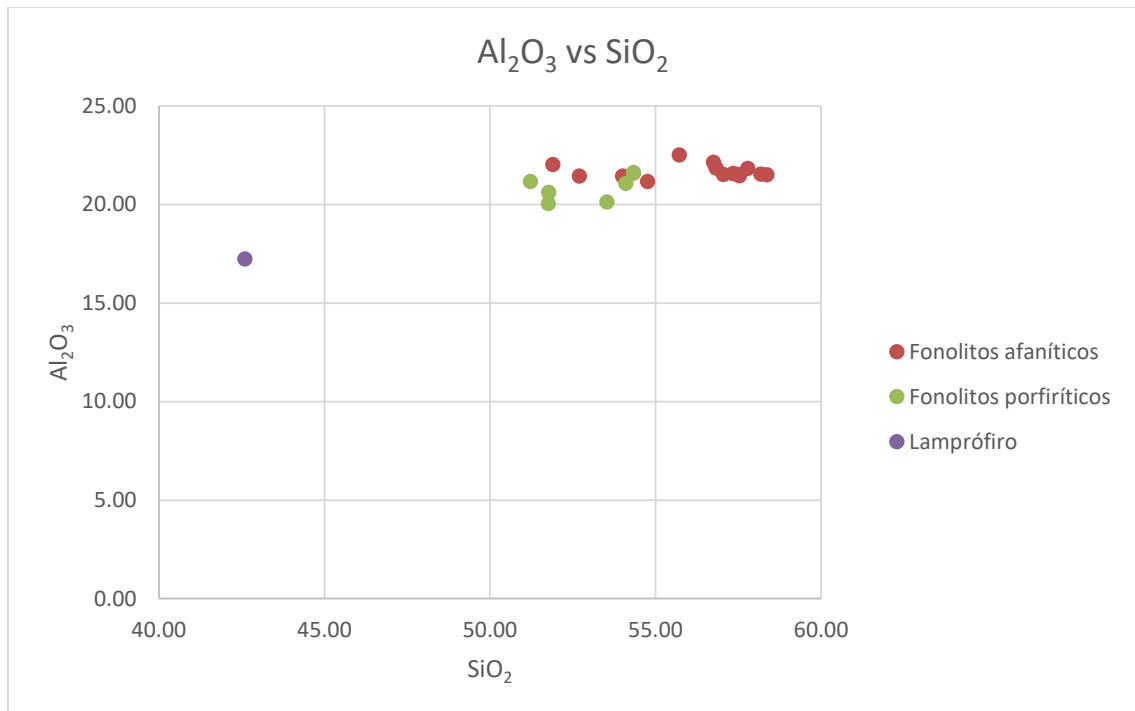


Figura 50: Diagrama tipo-Harker de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs  $\text{SiO}_2$  a partir dos dados de da Silva 2018.

#### 6.4.2 Diagramas tipo-Harker para os elementos traços:

Como podemos verificar elementos como o Y, Sr, Zr e Ba (figuras 51, 53, 54 e 58, respectivamente) possuem um comportamento antipatético e se concentram nos elementos que cristalizam e não no líquido remanescente; comportamento contrário dos elementos Pb, Zn e Nb (figuras 52, 55 e 56, respectivamente) que possuem um comportamento sinpatético se concentrando no líquido remanescente.

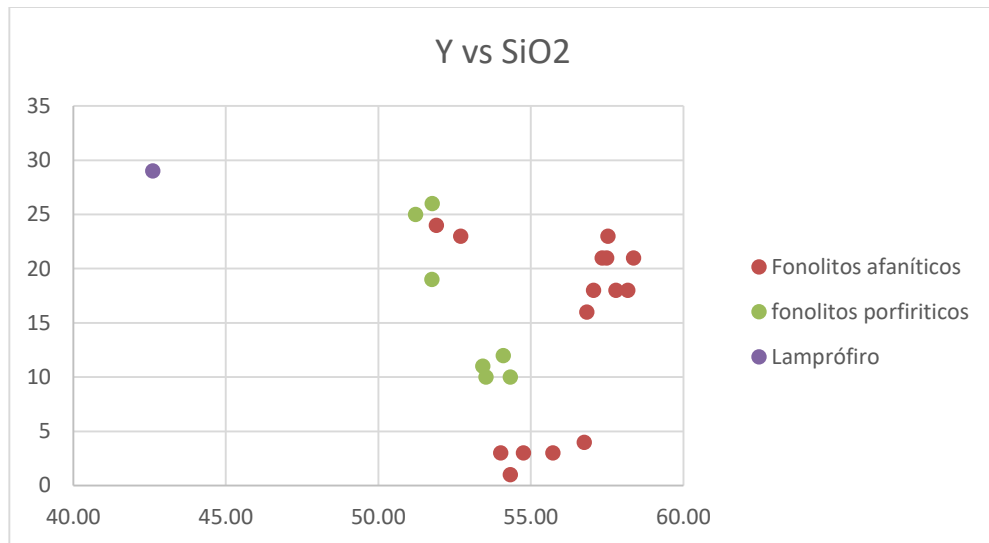


Figura 51: Diagrama tipo-Harker Y vs SiO<sub>2</sub> utilizando-se os dados de da Silva 2018.

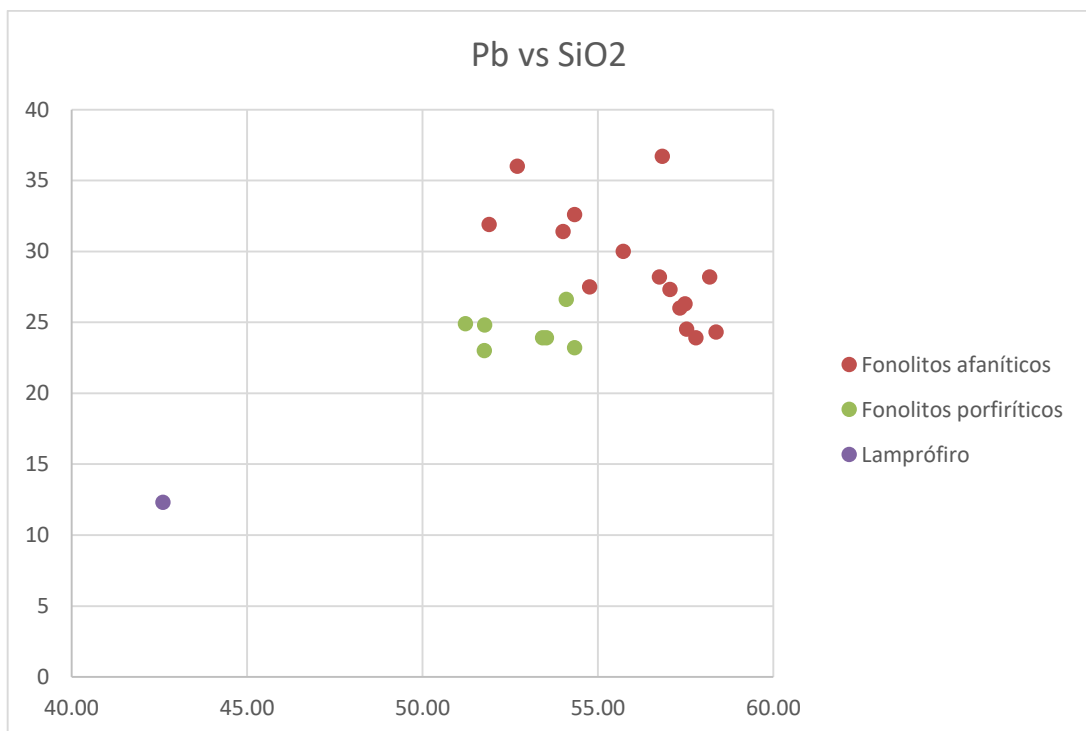


Figura 52: Diagrama tipo-Harker de Pb vs SiO<sub>2</sub> a partir dos dados de da Silva 2018.



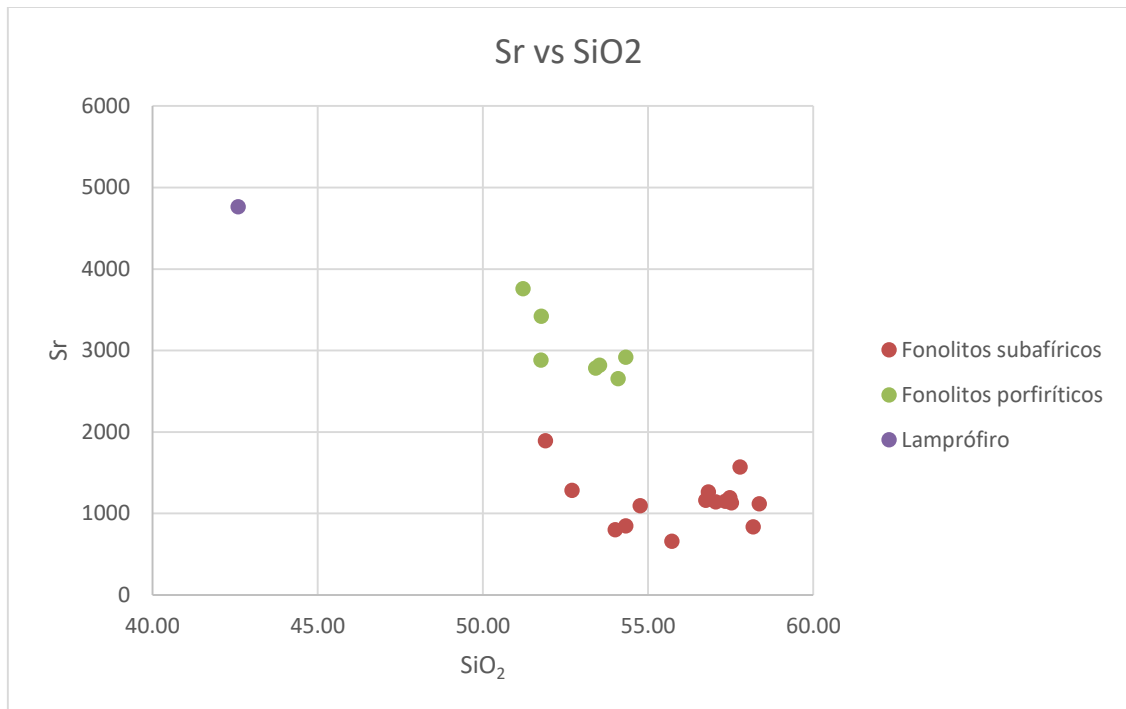


Figura 53: Diagrama tipo-Harker de Sr vs SiO<sub>2</sub> a partir dos dados de da Silva 2018.

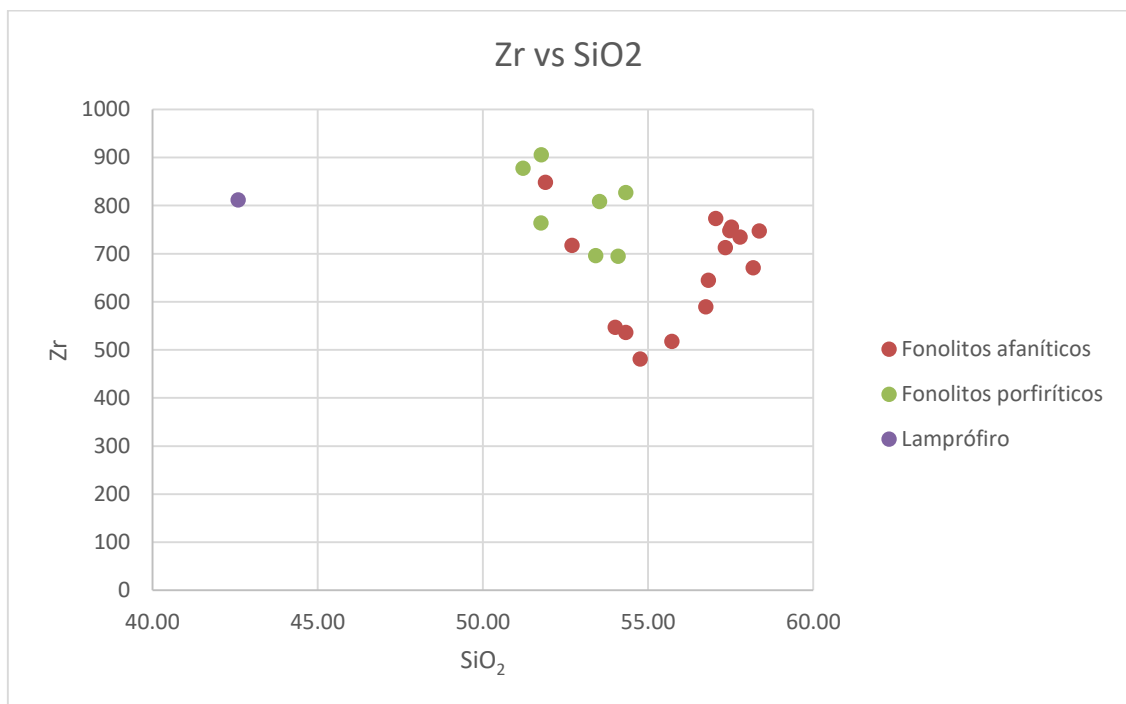


Figura 54: Diagrama tipo-Harker Zr vs SiO<sub>2</sub> a partir dos dados de da Silva 2018.

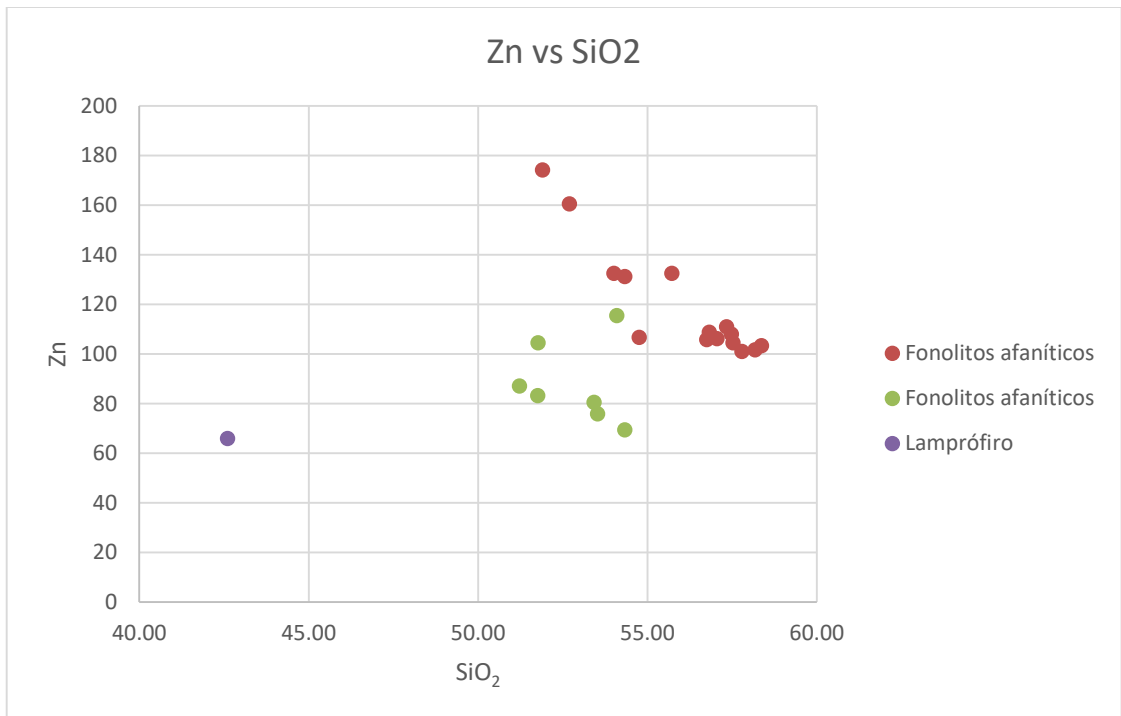


Figura 55: Diagrama tipo-Harker de Zn vs SiO<sub>2</sub> a partir dos dados de da Silva 2018.

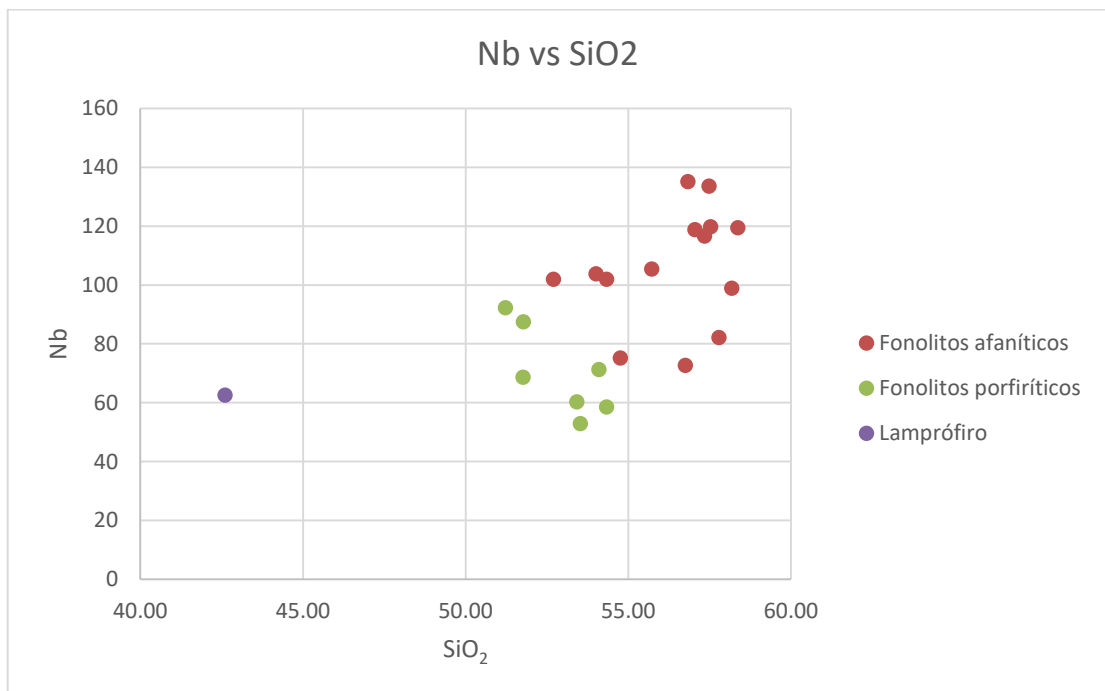


Figura 56: Diagrama tipo-Harker de Nb vs SiO<sub>2</sub> a partir dos dados de da Silva 2018.

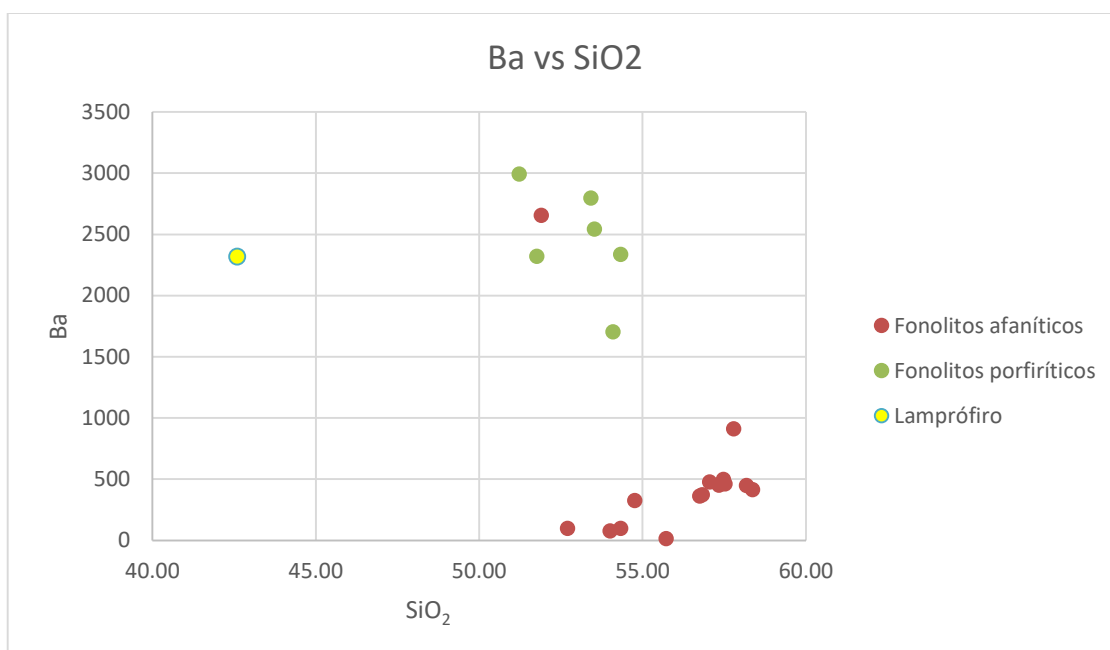


Figura 57: Diagrama tipo-Harker de Ba vs SiO<sub>2</sub> a partir dos dados de da Silva 2018.

## 6.5 Termobarometria

Para a realização destes cálculos foi usada a assembleia mineral de clinopiroxênios do LAMP e do FP. Todavia, não se obteve resultados bons para os enclaves – por não estarem em equilíbrio, por serem uma parte de uma outra rocha incorporada nesta – nem para os FS, uma vez que devido ao seu alto teor de Na não é possível seu uso nos cálculos de Neave e Putirka (2017).

### 6.5.1 Lamprófiro

Para o cálculo da pressão e temperatura das condições de cristalização do Lamprófiro, foram utilizados dados representativos anteriormente apresentados de microsonda eletrônica para a composição de cada tipo de clinopiroxênio encontrados na rocha (tabela 16). O cálculo elaborado por Neave e Putirka (2017), para pressão, e Putirka (2008), para temperatura, utiliza, além desses dados, os dados de rocha total em óxido (tabela 17).

Ao observarmos os dados, os resultados apresentados na tabela 18 e no gráfico gerado de equilíbrio (figura 58), podemos sugerir que o clinopiroxênio que se encontra

mais próximo do equilíbrio com o líquido é o núcleo incolor dos clinopiroxênios zonados com a borda verde. Para a formação destes dentro do cálculo de termobarometria temos uma sugestão de início de cristalização desta fase é de 10.7 Kbar e temperatura de 1149.5 °C, todavia esse número é uma aproximação do real equilíbrio.

Tabela 16: análises de microsonda eletrônica em óxido das análises de microsonda eletrônica dos clinopiroxênios do lamprófiro usadas para a termometria.

Clinopiroxênio Posição	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
Núcleo verde do cpx zonado com núcleo verde	44,04	1,38	7,48	16,71	0,72	6,28	21,93	1,28
Borda Incolor do cpx de centro verde	48,07	1,91	5,69	8,28	0,33	12,28	23,1	0,96
Núcleo incolor do cpx zonado com borda verde	50,25	2,1	5,66	8,16	0,19	12,38	23,91	0,62
Borda verde do cpx incolor não zonado	47,53	2,1	5,66	8,16	0,19	12,38	23,91	0,62
Núcleo do cpx incolor não zonado	49,15	1,29	4,57	9,6	0,21	11,65	23,04	0,96

Tabela 17: análises de elementos maiores do lamprófiro utilizada para termobarometria.

Rocha	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
Lamprófiro	42,6	1,72	17,24	5,18	0,21	6,36	9,7	5,04	2,64	3,8

Tabela 18: tabela de pressões e temperatura de formação para cada tipo de clinopiroxênio baseado na tabela anterior.

Mineral	T(K) – Putirka (2008)	T(°C) – Putirka (2008)	P(Kbar) Neave e Putirka (2017)
Núcleo verde do cpx zonado com núcleo verde	1405.1	1131.9	8.3
Borda Incolor do cpx de centro verde	1448.8	1175.7	12.2
Núcleo incolor do cpx zonado com borda verde	1422.7	1149.5	10.7
Borda verde do cpx incolor não zonado	1442.1	1169.0	12.0
Núcleo do cpx incolor não zonado	1489.1	1215.9	15.8

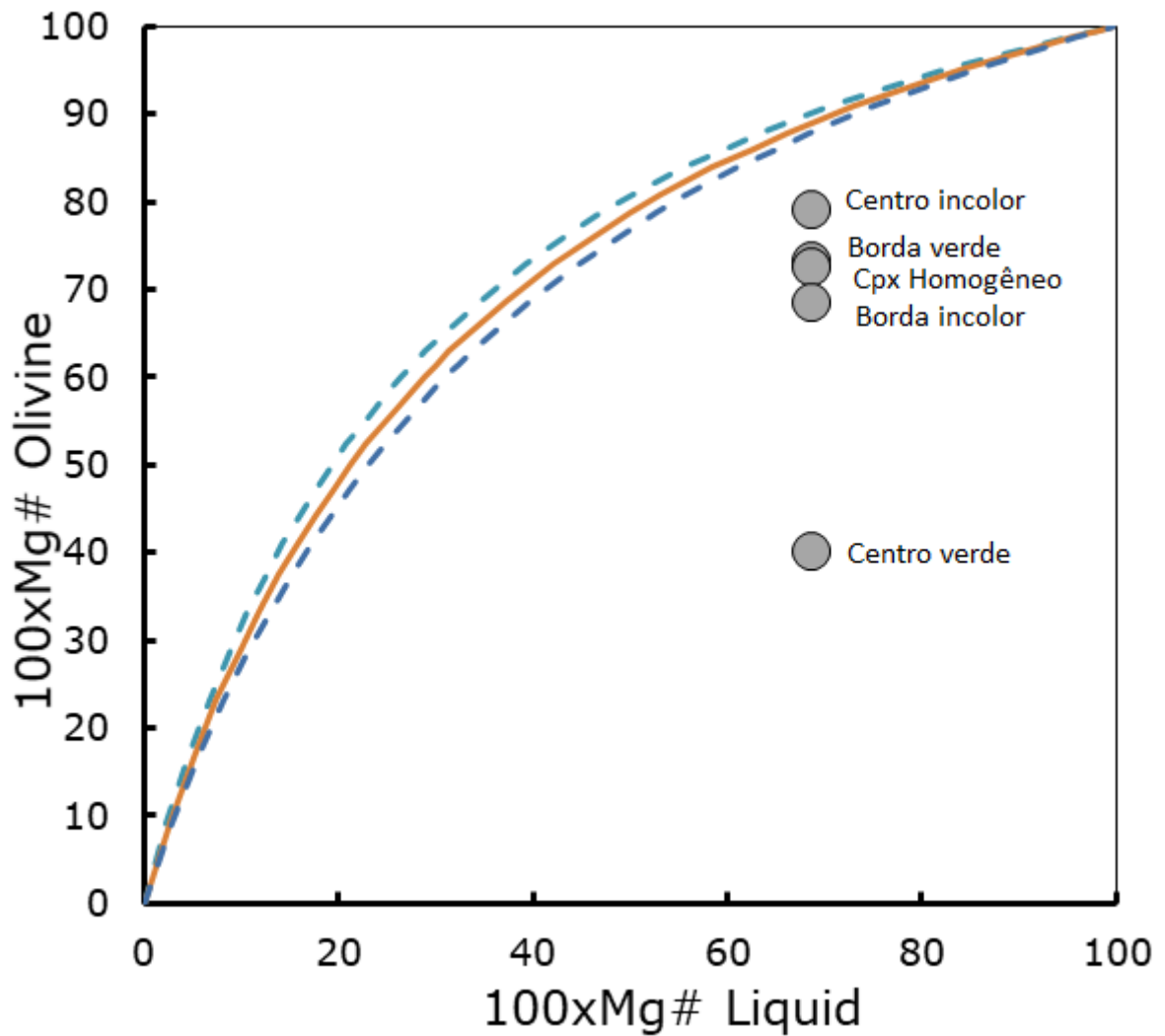


Figura 58: Diagrama de equilíbrio entre o clinopiroxênio observado e o equilíbrio dele com a composição em relação ao magnésio do líquido onde é cristalizado.

### 6.5.2 Porfírica

Para o cálculo da pressão e da temperatura das condições de cristalização das rochas porfíricas foi utilizado os dados de geoquímica de rocha total da ocorrência de número 25 e os dados de química mineral dos três tipos de clinopiroxênio do FP. Com isso foram utilizados os mesmos procedimentos especificados da ocorrência do LAMP baseando o cálculo da temperatura em Putirka (2008) e da pressão em Neave e Putirka (2017). Ao observarmos os dados e os

resultados apresentados na tabela 21 e no gráfico gerads de equilíbrio (figura 59) podemos sugerir que o clinopiroxênio que se encontra mais próximo do equilíbrio com o líquido é o núcleo incolor dos clinopiroxênios zonados de maneira concêntrica com a borda verde. Para a formação destes dentro do cálculo de termobarometria temos uma sugestão de início de cristalização desta fase é de 22,5 kbar 1268,1 °C.

Tabela 19: análises de microsonda eletrônica em óxido das análises de microsonda eletrônica dos clinopiroxênios das rochas porfíricas usada para a termometria.

Clinopiroxênio Posição	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
Núcleo incolor do cpx zonado com borda verde	43,87	1,32	7,3	18,5	0,19	5,53	21,3	1,46
Borda verde do cpx incolor não zonado	43,37	1,86	8,62	15,5	0,33	6,72	21,55	1,29
Núcleo verde do cpx zonado com núcleo verde	45,53	0,98	4,4	21,00	1,47	4,09	20,45	1,78
Borda Incolor do cpx de centro verde	45,85	1,11	4,25	20,2	1,46	4,27	20,59	1,74
Núcleo do cpx não zonado	45,12	1,03	4,64	21	1,45	4,00	20,69	1,68

Tabela 20: análises de elementos maiores da ocorrência 25 utilizada para termobarometria.

Rocha	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
Fonólito Porfírico	54,10	21,07	0,21	3,93	0,21	0,32	4,28	6,91	3,8

Tabela 21: tabela de pressões e temperatura de formação para cada tipo de clinopiroxênio baseado nas tabelas anteriores.

MINERAL	T(K)	T(°C)	P(Kbar) Neave e Putirka (2017)
Núcleo incolor do cpx zonado com borda verde	1541,2	1268,1	22,5
Borda verde do cpx incolor não zonado	1547,2	1274,1	23,4
Núcleo verde do cpx zonado com núcleo verde	1480,9	1207,7	16,8
Borda Incolor do cpx de centro verde	1474,6	1201,5	16,9
Núcleo do cpx não zonado	1476,1	1202,9	16,6



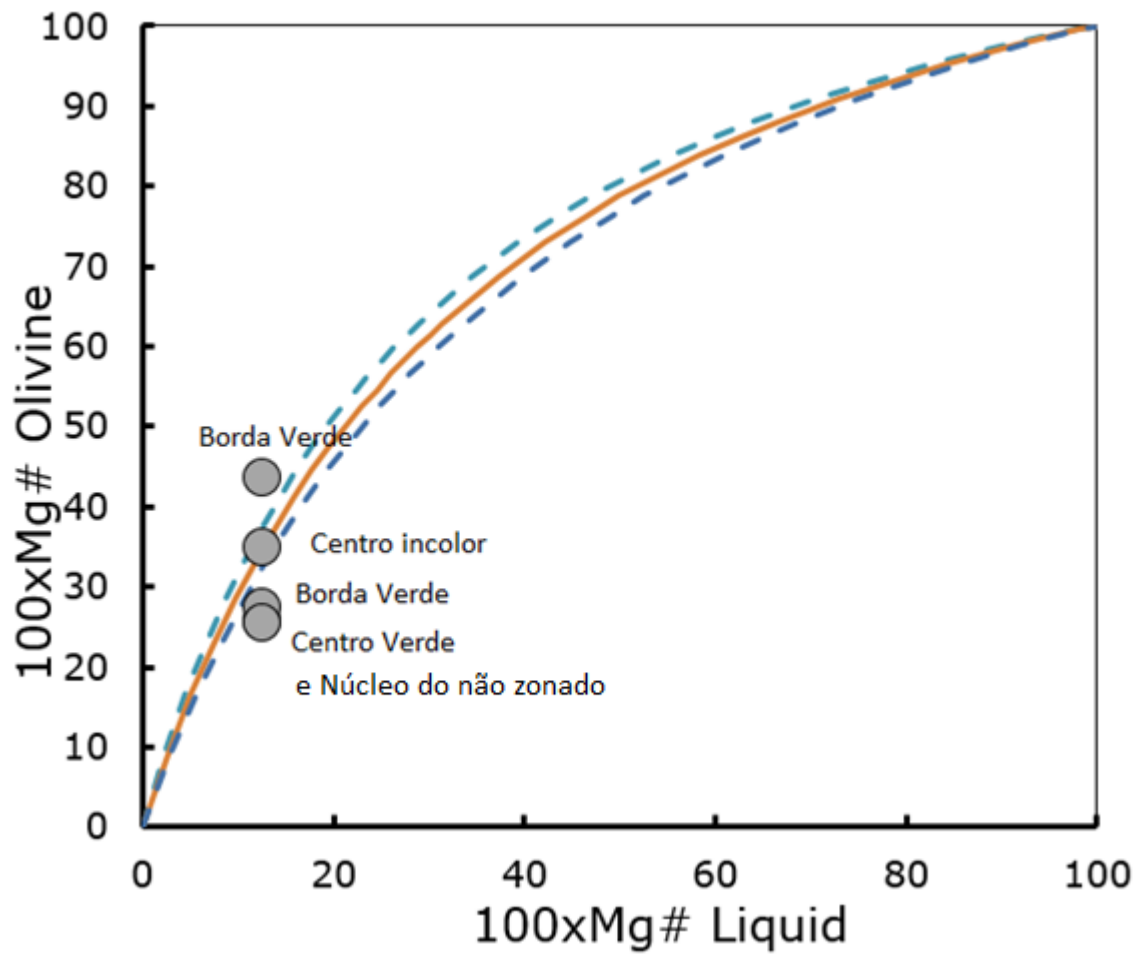


Figura 59: Diagrama de equilíbrio entre o clinopiroxênio observado e o equilíbrio dele com a composição em relação ao magnésio do líquido onde é cristalizado.

## 7 DISCUSSÃO:

Os dados de petrografia, geoquímica de rocha total, química mineral e de geobarometria/termometria permitiram caracterizar os três tipos de texturais propostos por da Silva (2018) na SAPC. Em concordância com este autor, identificamos que as rochas classificadas como FP possuem um teor de fenocristais de 15% a 30% e as rochas classificadas como FS são compostas por um teor de fenocristais inferior a 5%, todavia a rocha corpo 14 (LAMP), classificado por da Silva (2018) como basanito, neste trabalho é interpretada como um lamprófiro. Essa classificação baseia-se em dois principais argumentos: o primeiro é que os valores de olivina normativa (norma CIPW) são inferiores a 10%, característica diagnóstica para classificá-la como tefrito em vez de basanito; o segundo argumento é que a rocha não possui fenocristais félsicos e, portanto, mesmo que quimicamente a rocha classifique no diagrama TAS no campo dos basanitos/tefritos (figura 39), esse dado mineralógico contradiz essa classificação. A solução para a contradição entre a classificação química e a petrográfica é classificar a rocha como lamprófiro, de acordo com Le Maitre (2002), em função desta rocha ser constituída apenas por fenocristais máficos, entretanto ao buscarmos a classificação não foi possível enquadrá-la em uma subclassificação fazendo com que seja neste trabalho chamada somente de lamprófiro.

Como podemos observar nos gráficos de geoquímica (figuras 39 a 43) e nos diagramas tipo-Harker (figuras 44 a 57) existe uma diferenciação química entre os tipos petrográficos, além da diferenciação textural. A partir desses resultados podemos classificar os FS como fonolitos, os FP como fonolitos e tefri-fonolitos, e o LAMP que, como já discutido anteriormente, é classificado quimicamente como tefrito/basanito. No diagrama  $R_1XR_2$  podemos chegar a interpretações parecidas com a do TAS para os fonolitos, todavia este classifica o LAMP como tefrito (por esta classificação levar em conta quantidades de Mg e Fe). Neste diagrama, a separação entre os FS e os FP é mais evidenciada.

O diagrama envolvendo os elementos menores em função da sílica como o de Winchester e Floyd (1977) nos evidenciam duas observações sobre o processo de

diferenciação magmática: a primeira é o maior grau de diferenciação entre o lamprófiro e os FP e FS; e a segunda é o menor grau de diferenciação observado nos FS e FP, o que é dado principalmente pela alta mobilidade do Zr como afirmam os autores. A partir dos diagramas de  $Al_2O_3$ - $Na_2O$ - $K_2O$ , observamos que a suíte tem afinidade sódica, além disso podemos classifica-la como metaluminosa e em alguns casos suíte é peralcalina, o que é evidenciado pela sua composição mineralógica composta por feldspatoides sódicos. No diagrama de Shand (1943), observamos que a maioria das rochas são metaluminosas e somente duas ocorrências de FS são peraluminosas – sendo estes dados interpretados por processos de contaminação crustal ou como alteração da amostra.

A diferenciação magmática fica evidente nos diagramas tipo-Harker, especialmente dos elementos como Ti, Fe, Mg e Ca que mostram um *trend* negativo, uma vez que quanto maior é o fracionamento menor é a sua concentração no líquido, sugerindo que nos diferentes tipos de rocha de fato houve o fracionamento de um tipo petrográfico para o outro. Por outro lado, Na, K e Al têm uma relação inversa, ou seja, são concentrados nos tipos mais diferenciados, corroborando também com a ideia do fracionamento entre os três tipos petrográficos. Com isso podemos interpretar que minerais como os clinopiroxênios, titanita e a granada – minerais que são compostos por elementos como Ti, Fe, Mg e Ca – são os principais minerais diferenciados dos FP para os FS. Os FS apresentam maior concentração de Na, K e Al, como pode ser evidenciado pela mineralogia rica em feldspatos e feldspatoides e com os minerais máficos subordinados a esses.

Os diagramas tipo-Harker dos elementos traço indicam os mesmos padrões com alta concentração observados nos FS para os elementos Pb, Nb, Zn – devido a incompatibilidades desses elementos que são concentrados nos líquidos mais diferenciados. – Nos FP é observada uma alta concentração de elementos como Sr (presente no clinopiroxênio), Y e Zr (presente granada) e Ba (ocorre em altos teores nos fenocristais de feldspato alcalino) – esses valores são interpretados com base nos Kds desses elementos nestes minerais, como discutido por White (2005).

Ao observarmos a caracterização mineralógica dos constituintes de cada tipo petrográfico, podemos verificar que as feições de zonação são presentes em toda SAPC, indicam um frequente desequilíbrio entre mineral-líquido. Tal textura é

frequente em rochas vulcânicas e subvulcânicas em sistemas abertos como discutido por Streck (2008). Considerando os aspectos das zonações, foi possível separar nas três rochas, populações de diferentes tipos de clinopiroxênios. No LAMP foi possível identificar piroxênios: I) com núcleo incolor e borda verde zonada concentricamente; II) com núcleo verde desequilibrado com borda incolor; III) homogêneo não zonado incolor. Nos FP foi possível identificar quatro populações: I) clinopiroxênio zonado com o centro incolor homogêneo e com borda de coloração verde; II) clinopiroxênio com coloração verde amarelado não zonado (composição homogênea); III) clinopiroxênio zonado concentricamente com núcleo verde e borda verde; IV) piroxênios da matriz. Nos enclaves máficos, foram identificadas duas populações com diferenças químicas sem diferenças petrográficas importantes: I) augita e II) diopsídio. Nas FS, foram identificadas duas populações: I) os fenocristais de composição aegerina– augita e II) cristais na matriz que não foram analisados devido seu tamanho muito pequeno.

Dentro dessa diferenciação, foram feitas análises por microsonda eletrônica com o intuito de se compreender essas zonações e o que elas indicam em relação ao equilíbrio mineral-líquido. A partir disso, constata-se que existem padrões de zonação para cada tipo petrográfico: para o lamprófito (LAMP) a população dada como III possui uma zonação normal, migrando de um centro incolor mais rico em Mg para uma borda verde com finas zonações concêntricas mais ricas em Fe. Estas indicam um constante desequilíbrio durante a cristalização da borda; a população I com núcleo verde rico em Fe e borda incolor rica em Mg, classificada como uma zonação inversa que podemos interpretar como um possível antecristal englobado por um pulso mais primitivo que provoca a sua desestabilização, gerando as feições de reabsorção. O equilíbrio com este novo pulso é novamente atingido com a cristalização das bordas mais ricas em Mg; a população II são clinopiroxênios homogêneos incolores e não zonados que indicam cristalização mais próxima do equilíbrio com o líquido e apresentam uma composição de diopsídio.

Para os FP a população indicada como I é caracterizada por ter uma zonação normal, onde o núcleo incolor é mais rico em Mg e as bordas possuem uma composição mais rica em Fe, sugerindo um certo equilíbrio entre o líquido e a composição da borda do cristal; a população II não possui uma zonação e é

homogênea indicando um possível equilíbrio entre cristal-líquido, quimicamente é classificado como hedembergita; a população III possui uma pequena variação química entre centro e borda, indicando uma leve mudança nas condições de cristalização, estas podem ser pequenas flutuações de temperatura, de pressão e/ou de fugacidade de oxigênio (Vernon, 2004; Streck, 2008); a população IV encontrada na matriz não foi analisada devido ao tamanho muito pequeno dos cristais.

Os enclaves máficos apresentam duas populações classificadas quimicamente como augita e diopsídio. Os fonolitos subafíricos possuem duas populações de clinopiroxênios: a primeira população analisada trata-se dos clinopiroxênios mais sódicos encontrados na SAPC, e com isso, são interpretadas como aegerina-augitas mais ricas em Fe e Na do que as dos enclaves; a segunda população encontrada na matriz foi e classificada preliminarmente como aegerina-augita por Da Silva (2018), mas devido ao pequeno tamanho dos cristais, não foram obtidos resultados estatisticamente consistentes.

A partir das análises químicas destas populações de clinopiroxênios em cada tipo petrográfico e do uso da geoquímica de rocha total, foi possível utilizar o método da termobarometria proposto por Neave e Putirka (2017). Este método leva em consideração cálculos termodinâmicos de equilíbrio e atividade para as composições de rocha total e de química mineral dos clinopiroxênios.

Foi feita uma sistematização para o método, onde podemos observar na tabela 16 que foram feitos testes de uso do barômetro para cada zona textural de cada tipo de clinopiroxênio encontrado nos Lamprófiro e sua composição química de rocha total. Com isso, foram gerados os dados da tabela 18 que sugerem para cada zona uma pressão e uma temperatura de formação, que com auxílio da figura 58, podemos interpretar que a zona mais próxima ao equilíbrio com a composição geoquímica do lamprófiro são os núcleos incolores da população III citados neste capítulo. A partir dessa informação, podemos sugerir que não há, de fato, o equilíbrio devido o sistema aberto em que esses cristais foram gerados, em função do grande número de pulsos evidenciados pelas bordas desses cristais que estão também zonados. Todavia esta é a composição que representa a textura mais próxima do equilíbrio neste tipo petrográfico. Essa interpretação de desequilíbrio do clinopiroxênio com o magma

permite sugerir que o lamprófiro foi cristalizado em temperaturas próximas a 1149,5 °C e pressões próximas a 10,7 Kbar.

Com essa mesma sistematização foram realizados os mesmos passos para os FP, e foram obtidos os resultados da tabela 21 e a figura 59. Nesta tabela observamos que todas as zonas e todos os cristais estão próximos do equilíbrio, todavia o que mais se encontra em equilíbrio é o núcleo incolor da população I que possui uma zonação normal. Essas informações permitem interpretar que todos os cristais foram gerados a partir desse líquido, e portanto, o primeiro a cristalizar é este que apresenta o maior equilíbrio. Os cálculos sugerem que a cristalização deste magma iniciou em pressões de 22,5 Kbar e temperaturas de 1268.1 °C aproximadamente.

No caso dos FS não foram feitos os cálculos de termobarometria devido ao alto teor de Na dos clinopiroxênios. Neste método, altos teores de Na nos clinopiroxênios são considerados como valores da molécula de Jadeíta dentro da composição total do clinopiroxênio fazendo com que ele não seja aplicável para porção mais diferenciada da SAPC (Neave e Putirka, 2017).

Unindo todas as informações petrográficas, de química mineral, de rocha total e de termobarometria da SAPC, podemos chegar à conclusão de que se trata de um sistema aberto, que provavelmente se retroalimenta por novos pulsos. As pressões possivelmente não variam de acordo com a primitividade da ocorrência e sim de acordo com a sua concentração de voláteis e sua posição na crosta. No caso da ocorrência do LAMP, que não possui um equilíbrio termobarométrico, podemos sugerir que a ocorrência se trata de uma mistura entre líquidos mais diferenciados e líquidos primitivos, onde a cristalização ocorre em um sistema totalmente aberto e realimentado sendo impreciso determinar a composição exata do líquido no momento em que os clinopiroxênios cristalizaram inicialmente.

Os dados de geobarometria indicam que a rocha mais primitiva cristaliza em uma porção da crosta com pressões de aproximadamente 10Kbar, enquanto a mais diferenciada cristaliza a 20Kbar. Interpretamos que haja uma câmara inicial mais primitiva que alimenta duas subcâmaras, uma relacionada ao Lamprófiro e uma em relação as rochas porfiríticas. Isso pode ser interpretado pelas diferentes pressões que melhor representam o equilíbrio entre mineral-líquido para as diferentes

ocorrências, ou seja, não é possível que esses minerais tenham se formado em uma mesma câmara magmática anterior. Seguindo este mesmo argumento, não é compatível que os fonolitos porfíricos sejam de fato produtos da diferenciação do lamprófiro, pois este apresenta pressões menores de cristalização. A solução sugerida para esta questão é que a separação destes dois líquidos tenha se dado antes da cristalização do primeiro clinopiroxênio.

## 8 CONCLUSÕES:

Com base nas discussões feitas podemos concluir que:

- I) A Suíte Alcalina Passo da Capela esta subdividida entre Fonólitos Porfiríticos, Fonólitos Subafíricos e Lamprófiro, todavia a classificação química revela que os FS são fonolitos e os FP são fonolitos a tefrifonolitos;
- II) O lamprófiro é classificado desta maneira, pois as classificações químicas convencionais indicam composições tefríticas ou basaníticas que não são compatíveis com a mineralogia máfica dos fenocristais e, por outro lado, dentro da classificação de lamprófiros não é possível adotar uma nomenclatura específica em função da mineralogia observada;
- III) Existe um *trend* de diferenciação magmática entre esses tipos litoquímicos, onde as rochas com textura mais fina possuem um grau de diferenciação maior do que as mais grossas;
- IV) A diferenciação pode ser resumida pela cristalização de: apenas clinopiroxênios nos lamprófiros; clinopiroxênios e granadas nos fonolitos porfiríticos; e na ausência de ambos nos fonolitos subafíricos;
- V) Os fenocristais zonados de clinopiroxênio encontrados em todas as litologias são um indício de um sistema aberto, que se realimentou frequentemente por pulsos mais primitivos, gerando então texturas de zonação inversa e normal;
- VI) O único modo do líquido que formou o lamprófiro diferenciar para os fonolitos é terem sido separados antes da cristalização;
- VII) Dentro deste modelo, sugiro a existência de uma provável câmara magmática que se separa em outras câmaras magmáticas que dão origem as ocorrências da SAPC.



## REFERÊNCIAS

BARBIERI, M.; BECCALUVA, L.; BROTZU, P.; CONTE, A.; GARBARINO, C.; GOMES, C. B.; LOSS, E.; MACCIOTTA, .; MORBIDELLI, L.; SCHEIBE, L. F.; TAMURA, R. M.; TRAVERSA, G. Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil. 1. The phonolite suite from Piratini, RS. *Geochimica Brasiliensis*, 1987. 1: 109-138.

BAITELLI, R. Geocronologia por traços de fissão de maciços alcalinos do Brasil meridional. São Paulo, Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, 1992. 204p.

BORSA, G.N.O. 2017. Correlação cronoestratigráfica do Cinturão Triássico preservado no Gráben Arroio Moirão (RS). Porto Alegre, 43p. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, Programa de PósGraduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BURGER Jr. C.; RIBEIRO, M. & GERHARDT, A.L.B. On the alkaline rocks of Piratini, Rio Grande do Sul, Brazil. *Paula-Coutiana*, Porto Alegre, 1998. (2): 81- 112.

COMIN-CHIARAMONTI, P. GOMES, C.B. Mesozoic to cenozoic alkaline magmatism in the brazilian plataform. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Fapesp, 2005. Em COMIN-CHIARAMONTI, P. & GOMES, C.B. (EDS) Mesozoic to cenozoic alkaline magmatism in the brazilian plataform. São Paulo, Edusp/Fapergs, 2005. 149-158 p.

CPRM. Piratini: folha SH.22-Y-C-II: estado do Rio Grande do Sul. Brasília: programa geologia do Brasil, 2009.

DE LA ROCHE, H. LETERRIER, P. GRANDCLAUDE, P. & MARCHAL, E. "A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks using R1-R2 Diagram and major Elements Analyses. Its Relationships with Current Nomenclature". *Chemical Geology*, 1980. n. 29, 183-210 p.

Ernesto, M., Marques, L. S., Piccirillo, E. M., Molina, E. C., Ussami, N., Comin-Chiaramonti, P. I. E. R. O., & Bellieni, G. (2002). Paraná Magmatic Province–Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic considerations and alternative heat sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118(1-

2), 15-36.

HORBACH, R. KUCK, L. MARIMON, R.G. MOREIRA, H.L. FUCK, G.F. MOREIRA, M.L.O. MARIMON, M. P.C. PIRES, J. L. VIVIAN, O. MARINHO, D.

A. TEIXEIRA, W. Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro: IBGE (Levantamento de Recursos Naturais, 33), 1986. p. 29-312.

HOROTA, R. K. Petrologia e Geoquímica de Rochas Subsaturadas: Comparação Entre os Fonólitos da Suíte Alcalina Passo da Capela, RS e os Fonólitos da Formação Remédios, Arquipélago Fernando de Noronha, PE. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2014

LE BAS, M. J. LE MAITRE, R. W. STRECKEISEN, A. & ZANETTIN, B.

“A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica diagram”. *Journal of Petrology*, 1986. n. 27, 745-750 p.

LE MAITRE, R.W. *A classification of igneous rocks and glossary of terms. Recommendations of the IUGS subcommission on the systematic of de Igneous Rocks*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 2nd edn.

LIMA, T.S.; GOMES M. B.; DA SILVA M.D.; DRAGO, S. Aprimoramento de técnicas de microanálise em microsonda eletrônica, ênfase na análise de feldspatóides. Porto Alegre. 2018.

LIMA, T.S.; GOMES M. B.; DA SILVA M.D.; DRAGO, S. Caracterização química dos fonólitos da suíte Passo da Capela – Rs. Bento Gonçalves, ANAIS XVII SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA. 2019.

PHILIPP, R.P. VIERO, A.P. COMIN-CHIARAMONTI, P. GOMES, C.B. Mesozoic alkaline rocks of Rio Grande do Sul. Em COMIN-CHIARAMONTI, P. & GOMES, C.B. (EDS) Mesozoic to cenozoic alkaline magmatism in the brazilian plataform. São Paulo, Edusp/Fapergs, 2005. p. 573-590

PUTIRKA K. D., 2008: Thermometers and Barometers for Volcanic Sytems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, vol. 69 p. 61-120.

Renne P., Ernesto M., Pacca I.G., Coe R.S., Glen J.M., Prevót M., Perrin M. 1992a:

The Age of Paraná Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic Cretaceous Boundary. *Science*, 258:975-979.

RIBEIRO, M. "Structural setting of some alkaline pipes in Rio Grande do Sul Shield". Em "Symp. On Carbonatites". Poços de Caldas, MG, DNPM, 1978. n.4 59- 71p.

Sørensen, H. Introduction. *In The Alkaline Rocks*. Nova York, John Wiley & Sons, 1974. pp. 3-11.

STRECKEISEN, A. "IUGS Subcomission on the Systematics of Igneous Rocks. Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilitic Rocks. Recommendation and Sugestions" *News Jahrbuch fur Mineralogie, Abhandlungen*, 1978. n. 134, 1-14 p.

STRECK, M. J. Mineral textures and zoning as evidence for open systems processes. *Review in Mineralogy and geochemistry*, 2008. n. 69, 595-622.

Turner, S., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C., Mantovani, M., 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology. *Earth and Planetary Science Letters* 121, 333±348.

VERNON, R.H. Microstructures of high-grade metamorphic rocks at Broken Hill, Australia. *J. Petrol.* 1968. 9:1-22.

VIERO, A.P. O Magmatismo máfico alcalino Mesozóico do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 249p.

### ANEXO A – Geoquímica de rocha total de da Silva (2018)

Dados Geoquímicos de Rocha Total de elementos maiores. N.D. = não detectado.														
Nº		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>4</sub>	LO <sub>I</sub>	Total
2	Fon-Afírico	57,34	21,57	0,26	2,64	0,21	0,42	1,6	7,68	6,05	0,031	n.D	2,18	99,98
4	Fon-Afírico	56,83	21,85	0,22	2,06	0,21	0,11	1,19	7,45	5,23	0,06	n.D	4,79	100
9	Fon-Afírico	57,48	21,52	0,25	2,07	0,23	n.D	1,08	8,27	6,22	0,022	n.D	2,9	100,04
18	Fon-Afírico	57,79	21,84	0,2	2,21	0,21	n.D	1,35	7,84	6,86	0,012	n.D	1,71	100,02
20	Fon-Afírico	58,18	21,54	0,21	1,76	0,22	0	1,06	9,06	6,75	0,02	n.D	1,09	99,88
22	Fon-Afírico	58,37	21,51	0,22	2,06	0,21	0,07	0,95	7,93	6,74	0,015	n.D	1,88	99,96
23	Fon-Afírico	54,01	21,45	0,15	2,44	0,15	n.D	1,37	9,82	5,93	0,02	0,77	4,63	100,72
38	Fon-Afírico	54,33	21,61	0,47	3,59	0,17	0,19	3,94	7,42	5,86	0,09	n.D	2,31	99,98
30	Fon-Afírico	56,75	22,14	0,18	2,32	0,17	n.D	1,54	8,42	6,42	0,006	n.D	2,04	99,99
31	Fon-Afírico	52,7	21,45	0,34	3,32	0,25	0,14	2,4	8,72	4,63	0,061	n.D	5,95	99,96
32	Fon-Afírico	51,9	22,03	0,33	3,54	0,30	0,94	1,59	8,00	5,26	0,07	n.D	6,05	100,02
33	Fon-Afírico	55,72	22,51	0,15	2,37	0,16	n.D	1,17	8,79	6,4	0,009	n.D	2,77	100,05
34	Fon-Afírico	57,05	21,52	0,222	2,09	0,22	n.D	1,04	7,86	6,8	0,02	n.D	3,2	100,02
39	Fon-Afírico	57,53	21,46	0,21	2,06	0,21	n.D	0,99	7,81	6,89	0,015	n.D	2,79	99,97
11. 1	Fon-Afírico	54,76	21,17	0,19	2,28	0,17	n.D	1,52	10,82	6,26	0,01	0,48	1,65	99,3
8	Fon- Porfírico	51,77	20,62	0,44	3,62	0,24	0,85	4,82	7,64	4,48	0,09	n.D	5,41	99,99
16	Fon- Porfírico	51,22	21,17	0,92	5,15	0,22	0,72	6	7,84	4,84	0,21	n.D	1,65	99,94

	N°	SiO2	Al2O3	TiO2	FeO3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	SO4	LOI	Total
25	Fon- Porfirítico	54,1	21,07	0,52	3,93	0,18	0,32	4,28	6,915	5,74	0,11	n.D	2,8	99,97
29	Fon- Porfirítico	51,76	20,05	0,89	5,02	0,19	0,75	4,88	8,06	5,13	0,18	1,2	1,91	100,01
38	Fon- Porfirítico	54,33	21,61	0,47	3,59	0,17	0,19	3,94	7,42	5,86	0,09	n.D	2,31	99,98
8.1	Fon- Porfirítico	53,53	20,13	0,37	3,28	0,18	0,16	3,67	9,24	5,42	0,07	2,33	1,67	100,04
9.1	Fon- Porfirítico	53,42	19,74	0,4	3,47	0,2	0,49	5,16	6,06	5,32	0,07	n.D	5,72	100,04
14	LAM	42,6	17,24	1,72	8,83	0,21	6,36	9,7	5,04	2,64	0,51	1,62	3,56	100,04

Tabela 36: Dados Geoquímicos de Rocha Total de elementos traço. N.D.  
= não detectado.

	N <sub>o</sub>	Y	Pb	Ni	Cu	Sr	Zr	Zn	Nb	Rb	Cr	Ba	Nb/Y	Zr/N <sub>b</sub>	Y/Nb	Nb+ Y
2	F. A.	21,3	26	n.D	10,1	1150,4	712,3	111	116,6	122,8	21,2	450,7	5,5	6,1	0,2	137,9
4	F. A.	16,6	36,7	n.D	n.D	1264	644,3	108,8	135,1	105,9	10,6	372,9	8,1	4,8	0,1	151,7
9	F. A.	21,3	26,3	n.D	n.D	1193	747,4	108	133,6	125,7	12,7	498,5	6,3	5,6	0,2	154,9
18	F. A.	18,5	23,9	n.D	n.D	1571,5	734,3	101	82,1	125,8	13,2	910,4	4,4	8,9	0,2	100,6
20	F. A.	18,2	28,2	5,4	0	838,3	670,2	101,7	98,9	130,6	10,6	447,7	5,4	6,8	0,2	117,1
22	F. A.	21,7	24,3	n.D	n.D	1118,3	747	103,4	119,4	136,2	10,2	415,2	5,5	6,3	0,2	141,1
23	F. A.	3	31,4	4,9	0	803	546,8	132,5	103,8	127,6	12,3	76,8	34,6	5,3	0,0	106,8
38	F. A.	1,9	32,6	n.D	n.D	849	536	131,2	101,9	125,8	9,1	97,5	53,6	5,3	0,0	103,8
30	F. A.	4,3	28,2	n.D	n.D	1164,3	589,4	105,8	72,7	126,6	14,1	362,2	16,9	8,1	0,1	77,0
31	F. A.	23,4	36	n.D	n.D	1283,1	717,1	160,6	101,9	125,8	9,1	97,5	4,4	7,0	0,2	125,3
32	F. A.	24	31,9	n.D	n.D	1894,4	848,3	174,2	257,6	109,1	7,4	2655,3	10,7	3,3	0,1	281,6
33	F. A.	3,2	30	n.D	n.D	661,5	517,1	132,5	105,4	142,8	14	15,7	32,9	4,9	0,0	108,6

34	F. A.	18,8	27,3	n.D	n.D	1144,6	773	106,2	118,8	136,4	11,5	478,7	6,3	6,5	0,2	137,6
	N°	Y	Pb	Ni	Cu	Sr	Zr	Zn	Nb	Rb	Cr	Ba	Nb/Y	Zr/Nb	Y/Nb	Nb+Y
39	F.A.	23,1	24,5	n.D	n.D	1133,3	755	104,6	119,7	136,8	13,1	461,9	5,2	6,3	0,2	142,8
11.1	F. A.	3,3	27,5	5,5	n.D	1097	480,9	106,7	75,2	121,5	8	326,2	22,8	6,4	0,0	78,5
8	F.P	26,6	24,8	n.D	n.D	3420,5	905,2	104,6	87,4	90,5	9,9	4650,7	3,3	10,4	0,3	114,0
16	F.P	25,6	24,9	n.D	n.D	3758,7	877,4	87,1	92,2	89,2	8,8	2994,2	3,6	9,5	0,3	117,8
25	F.P	12,6	26,6	n.D	n.D	2656,9	694,7	115,5	71,2	107,9	9,6	1703,1	5,7	9,8	0,2	83,8
29	F.P	19,6	23	n.D	n.D	2881,5	763,8	83,2	68,6	87,4	6,4	2321,8	3,5	11,1	0,3	88,2
38	F.P	10,6	23,2	n.D	n.D	2918,5	826,8	69,5	58,5	99,9	12,4	2335,9	5,5	14,1	0,2	69,1
8.1	F.P	10,3	23,9	n.D	n.D	2821,9	808,3	75,9	52,9	97,4	7	2544,6	5,1	15,3	0,2	63,2
9.1	F.P	11,7	23,9	n.D	n.D	2783,3	695,9	80,5	60,2	93,4	7	2797,5	5,1	11,6	0,2	71,9
14	LA M	29,6	12,3	76,3	28,5	4762,3	811,7	65,9	62,5	83,3	117,1	2316,6	2,1	13,0	0,5	92,1

Anexo : Norma CIPW calculada para todas as litologias de Da Silva (2018)														
Nº	(Q)	(Or)	(Ab)	(An)	(Ne)	(Di)	(Ol)	(Mt)	(Il)	(Ap)	(Ac)	(Wo)	(Hm)	(Pf)
2	F.A.	35,75	34,49	6,51	16,52	0,87	0,45		0,47	0,07			2,64	0,02
4	F.A.	30,91	43,50	5,45	10,59		0,19	0,08	0,42	0,14			2,00	
9	F.A.	36,76	34,38	3,23	19,28	0,27		0,06	0,47	0,05		0,66	2,03	
18	F.A.	40,54	30,44	4,14	19,45	0,27		0,14	0,38	0,03		0,86	2,11	
20	F.A.	39,89	27,98		24,50	0,27		0,14	0,40	0,05	3,04	1,97	0,61	
22	F.A.	39,83	33,66	3,19	18,12	0,38		0,08	0,42	0,03		0,37	2,00	
23	F.A.	35,04	20,62		30,71	0,27		0,09	0,28	0,05	5,09	2,61	0,62	
38	F.A.	34,63	25,20	8,35	20,36	1,02			0,38	0,21		3,47	3,59	0,46
30	F.A.	37,94	29,16	3,65	22,80	0,27		0,07	0,34	0,01		1,48	2,27	
31	F.A.	27,36	30,98	5,71	23,19	0,75			0,56	0,14		1,92	3,32	0,08
32	F.A.	31,08	26,99	7,35	22,07		1,64	0,06	0,63	0,17			3,50	
33	F.A.	37,82	26,67	3,06	25,85	0,27		0,12	0,28	0,02		0,95	2,29	
34	F.A.	40,19	30,36	3,35	19,58	0,27		0,11	0,42	0,05		0,53	2,02	
39	F.A.	40,72	31,07	3,15	18,97	0,27		0,11	0,40	0,03		0,52	1,98	
30	F.A.	36,99	16,52		31,16	0,31			0,36	0,02	6,60	2,93		
8	F.P	26,48	25,65	8,74	21,13	4,58			0,53	0,21		3,38	3,62	0,27
16	F.P	28,60	19,67	8,28	25,28	3,88			0,49	0,49		5,34	5,15	1,13
25	F.P	33,92	26,21	9,50	17,50	1,72			0,41	0,25		3,21	3,93	0,52
29	F.P	30,32	22,24	3,38	24,90	4,04			0,43	0,42		5,05	5,02	1,13
38	F.P	34,63	25,20	8,35	20,36	1,02			0,38	0,21		3,47	3,59	0,46
37	F.P	32,03	21,44		28,13	0,86			0,41	0,16	4,25	6,70	1,81	0,27
40	F.P	31,44	28,20	10,95	12,50	2,64			0,45	0,16		4,25	3,47	0,28
14	LAM	15,60	7,33	16,62	19,13	17,93	5,29		0,47	1,18			8,83	2,51