

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISE TEXTURAL E MICROESTRUTURAL DE CHIBINITOS E  
LUJAURITOS DO CORPO LUJAURÍTICO-CHIBINÍTICO DO ANEL NORTE  
DO MACIÇO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS (MG-SP)**

Ludmila Maria Fonseca Teixeira

Orientadora: Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2016 / 31)

SÃO PAULO

2016

TF  
T266  
LMF.a

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ANÁLISE TEXTURAL E MICROESTRUTURAL DE CHIBINITOS E LUJAURITOS DO  
CORPO LUJAURÍTICO-CHIBINÍTICO DO ANEL NORTE DO MACIÇO ALCALINO DE  
POCOS DE CALDAS (MG-SP)

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA



TF 16/31

Aluna: Ludmila Maria Fonseca Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

IGc-Instituto de Geociências



Análise textural e microestrutural de chibinitos e lujauri  
do corpo Iujaurítico-chibinítico do  
M27116

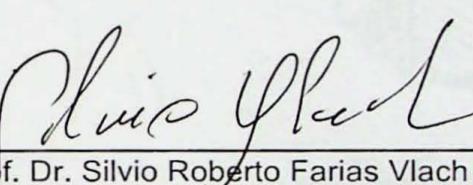
São Paulo

2016

TF  
T266  
LMFa



Ludmila Maria Fonseca Teixeira  
Ludmila Maria Fonseca Teixeira

  
Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach



## RESUMO

As técnicas de imageamento eletrônico são muito importantes para estudos texturais no âmbito das geociências, uma vez que apresentam uma capacidade de magnificação maior do que as técnicas óticas convencionais. No caso de rochas com feldspatos alcalinos, a catodoluminescência é uma das mais interessantes a serem usadas, uma vez que esses minerais possuem duas respostas distintas muito interessantes na literatura: luminescência azul nos cristais primários e vermelha nos cristais alterados por processos tardios. Neste cenário, as rochas agpaíticas do corpo Iujaurítico-chibinítico do anel norte do maciço alcalino de Poços de Caldas inserem-se como um atraente estudo de caso, por diversos aspectos incomuns encontrados nessas rochas, entre eles: a presença de uma geração tardia- a pós-magmática de piroxênios (no caso dos Iujauritos, aglomerados em uma textura de *folhas* que envolve os cristais mais antigos) e a coexistência de dois estados estruturais diferentes em um mesmo feldspato alcalino, que se apresentam como formas mistas de ortoclásio e microclínio, evidenciada por uma geminação múltipla parcial nos cristais.

Os resultados aqui obtidos demonstram a presença de catodoluminescência tanto azul quanto vermelha nos feldspatos alcalinos dessas rochas. De maneira geral, a luminescência azul é mais constante e intensa, enquanto a vermelha é mais esparsa e fraca, por vezes concentrando-se apenas em algumas zonas dos cristais – inclusive em fraturas, sugerindo uma relação com processos de percolação de fluidos tardia. Além disso, as zonas com luminescência vermelha mais intensa correspondem àquelas em que há mudança estrutural no feldspato, que passa a ser triclinico, confirmado que a origem dessa alteração está, de fato, relacionada a processos hidrotermais. Foi observada também a presença de uma massa de nefelina e zeólita, cristalizada juntamente com a textura de folhas dos Iujauritos, que se sobrepõe à cristais anteriores – considerada, portanto, também posterior.

Assim, esse estudo sugere que o mesmo processo que gerou os piroxênios tardios e a textura típica dos Iujauritos foi também responsável pela alteração estrutural dos feldspatos, indicando assim, que um fator hidrotermal deve ser considerado na elaboração de hipóteses para a origem dessas rochas.

## ABSTRACT

Electron imaging are an important tool for textural studies in geoscience, as they have a higher magnification than the conventional optical techniques. In the study of alkali-feldspar bearing rocks, catholuminescence is one of the most interesting methodologies, as alkali-feldspar shows two markedly distinct responses, as reported in the literature: blue luminescence has been identified on primary crystals and red luminescence on crystals modified by late processes. In this scenario, the agpaitic rocks of Iujauvritic-khibinitic northern ring body of Poços de Caldas alkaline massif are an attractive case study, due some particular characteristics of these rocks: the presence of late- post-magmatic phase of pyroxenes (agglomerated in the Iujauvritic texture, involving the older crystals) and the coexistencence of two different structural states in the alkali feldspar (orthoclase and microcline), shown as a multiple twinning.

The results demonstrate the presence of blue and red luminescence on the alkali-feldspar of the Iujauvrites and khibinites. The blue luminescence is typically constant and intense, whilst the red one is sparse and weak, usually concentrating on some portions of the crystals, including fractures. This suggests a relation with late fluid percolation processes. Some of these portions correspond to structural crystal changes in the feldspars, from monoclinic to triclinic. This indicates that the source of this feature is rather hidrotermal. It is also observed that a nefeline and zeolite mass crystallized alongside the pyroxene agglomerates. This is therefore also considered a late phase.

This study therefore proposes that the process that generated the pyroxenes is also responsible for structural changes in the alkali feldspars. This indicates that a hidrotermal factor should be considered on the petrogenetic hypothesis for these rocks.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho não teria sido viabilizado se ausentes aqueles que de alguma forma colaboraram. Faço deste espaço, portanto, a minha tentativa de dar o devido reconhecimento a todos aqueles contribuíram e permitiram a conclusão deste:

Ao Sílvio, primeiramente, pela enorme dose de paciência, do início ao fim. Pelo respeito para com minhas ideias e interpretações, pelos ensinamentos e pela amizade.

À FAPESP, pelo suporte financeiro (projeto 2015/23532-3, vinculado ao temático 2012/0682-6).

Ao NAP, pela disponibilização do laboratório e, em especial ao Leandro, pelo auxílio com as análises.

Ao Prof. Dr. Horst Peter H. G. J. Ulbrich e ao Guilherme A. R. Gualda pelas amostras de Poços de Caldas.

Aos amigos que também colaboraram: Renata Melo, Carla Guedes e Mikaela Ballis pelas correções gramaticais. Às duas primeiras inclusive pela disposição em ler essa monografia sem conhecer um terço das palavras aqui utilizadas... Adrianna Virmond e Pedro Augusto por variadas pequenas ajudas ao longo de todo o ano. Carolina Cardoso pela edição de algumas imagens. Os amigos físicos, químicos e engenheiros de Durham (impossível citar todos) que me ajudaram na compreensão de bases essenciais neste trabalho e que sempre estavam disponíveis para eventuais dúvidas. Katharine Groves, pela correção do abstract.

À minha família e todos amigos, pelo suporte, sempre tão necessário em tempos de grandes preocupações. Chegamos aqui juntos. Obrigada.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	2
3. JUSTIFICATIVA .....	2
4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....	3
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
5.1. Seleção de amostras para estudo .....	4
5.2 Atividades laboratoriais.....	5
5.3 Tratamento dos dados .....	6
6. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA .....	6
6.1 O Maciço Alcalino de Poços de Caldas .....	6
6.1.1 O Corpo Lujaurítico-Chibinítico do Anel Norte .....	7
6.2 Interações de elétrons com a matéria .....	10
6.2.1 Elétrons retroespalhados .....	11
6.2.2 Catodoluminescência .....	14
7. RESULTADOS OBTIDOS .....	17
7.1 Descrições macroscópicas gerais e classificação modal .....	17
7.2 Descrições ao microscópio petrográfico .....	18
7.2.1 Chibinitos .....	18
7.2.2 Lujauritos.....	23
7.2.3 Nefelina sienito.....	24
7.3 Imageamento eletrônico .....	31
7.3.1 Chibinito .....	31
7.3.2 Nefelina sienito.....	36
7.3.3 Lujaurito .....	41
8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	51
9. CONCLUSÕES .....	52
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localização da cidade de Poços de Caldas e da Pedra Balão, com estrutura anelar visível na imagem de satélite (Google Earth, 2016).....	3
Figura 2: Mapa geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. O Corpo Lujaurítico-Chibinítico corresponde a área rachurada no extremo norte da estrutura (ver legenda na própria figura). (Modificado de Ellert et al., 1959) .....	4
Figura 3: Mapa das fácies do Corpo Lujaurítico-Chibinítico (Ulbrich, 1984). ....	7
Figura 4: Interações obtidas pela incidência de um feixe de elétronem uma amostra – raios-x, catodoluminescência, elétrons retroespalhados, elétrons secundários, elétrons auger, elétrons transmitidos. (Modificado de Yacobi e Holt, 1990) .....	11
Figura 5: Variação do coeficiente $n$ em relação ao número atômico ( $Z$ ) para $E_0 = 20$ keV (energia dos elétrons incidentes). (Heinrich, 1996, apud Goldstein, 2007). .....	12
Figura 6: Distribuição do retro-espalhamento para amostras planas em relação ao ângulo ( $\Phi$ ) entre o feixe incidente ( $n$ ) e o vetor do detector ( $m$ ). (Goldstein et al., 2007). .....	13

Figura 7: Profundidade atingida na amostra pelos elétrons antes do espalhamento para diferentes elementos. A profundidade ( $\mu m$ ) está em relação a $R_{K0}$ e o coeficiente de retro-espalhamento está normalizado. ....	14
Figura 8: Profundidade atingida pelos elétrons na amostra ( $R_{CL}$ ) em comparação com o padrão $R_{K0}$ (Remond et al., 2000).....	15
Figura 9: Diagrama FA-P-F (Le Maitre, 2002) para classificação de rochas insaturadas, onde FA: feldspato alcalino; P: plagioclásio; F: feldspatóides. Vermelho: chibinitos. Azul escuro: NeSi I. Azul claro: NeSi II. Rosa: Lu I. Roxo: Lu II. Quadrados cheios: dados de Ulbrich, (2002). Bolhas: dados de (Gualda, 1998). Quadrados vazios: estimativa visual neste trabalho. ....	18
Figura 10: Visão geral da textura poiquilitica na rocha, com inclusões de feldspatos e nefelinas na egirina. Observa-se também a presença de grandes cristais de feldspato alcalino tabulares, levemente orientados. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	21
Figura 11: Chibinitos com feldspatos alcalinos exibindo geminação múltipla no microclínio. Na imagem A, identifica-se os minerais observados (pectolita, feldspato alcalino e nefelina). Na imagem B: 1) ausência de geminação; 2) geminação incipiente; 3) geminação pobre; 4) geminação boa (Ulbrich, 1983). Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	21
Figura 12: Alinhamento das nefelinas de acordo com a orientação dos feldspatos tabulares, além de cristais de piroxênio ripiformes cristalizados segundo a orientação dos cristais maiores. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	21
Figura 13: Feldspato alcalino e nefelina em contato irregular entre os grãos, com arestas e vértices curvilíneos. Observa-se a nefelina adentrando os cristais de feldspato alcalino. Nota-se também pequenos cristais prismáticos de egirina. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	22
Figura 14: Feldspato alcalino e nefelinas idiomórficos inclusos em egirina poiquilitica. Nota-se o formato irregular dos contatos, de aspecto ligeiramente corroído. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	22
Figura 15: Piroxênio poiquilitico com zoneamento concêntrico e inclusões tabulares de feldspato alcalino e nefelina. Os feldspatos alcalinos mostram-se manchados, com geminação múltipla incipiente predominante. Nota-se também cristais ripiformes de piroxênio, cristalizados nos contatos entre os demais minerais. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	22
Figura 16: Visão geral da textura Iujaurítica, com folhas de piroxênios cristalizadas nos contatos entre os minerais. ....	26
Figura 17: Acúmulo local de cristais de nefelina muito alterados e de bordas difusas, com pouco crescimento das egirinas de segunda geração. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	26
Figura 18: Cristais de microclínio com geminação múltipla. Na figura B: 1) geminação boa; 2) geminação pobre; 3) geminação múltipla ausente (presente a geminação carlsbad), de acordo com Ulbrich (1983).Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	26
Figura 19: Feldspato alcalino com geminação carlsbad com borda de aspecto corroído devido ao crescimento da segunda geração de piroxênios. O feldspato mostram geminação múltipla incipiente. Figura A (à esquerda) com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados (à direita). ....	27
Figura 20: Alteração nas bordas de aspecto corroído nas nefelinas e cristais de egirina apontando para dentro do mineral. Nota-se a textura de acúmulo de piroxênios em folhas, contornando os demais minerais. Observa-se também cristais tabulares de feldspato alcalino e um cristal de eudialita com alteração rosa nas bordas. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	27

Figura 21: Eudialita preenchendo interstícios entre os feldspatos alcalinos tabulares, se amoldando ao espaço disponível e cristalização posterior de piroxênios nas arestas dos cristais e no interior da eudialita. Na parte interior da imagem também é visível um feldspato alcalino com geminação carlsbad e geminação múltipla (pobre – Ulbrich, 1983) concomitantes. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	27
Figura 22: Folhas de piroxênios de segunda geração seguindo os contatos entre os minerais (feldspato alcalino tabular e nefelina xenomórfica com bordas alteradas). Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	28
Figura 23: Egirinas adentrando nos cristais tabulares de feldspato alcalino. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	28
Figura 24: Prismas de egirinas no interior feldspato alcalino com geminação carlsbad orientados de forma concêntrica. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	28
Figura 25: Finas agulhas de egirinas com orientação preferencial segundo a elongação dos feldspatos alcalinos. Na foto observa-se dois cristais diferentes e duas distintas direções de paralelismo dos piroxênios. Na interface entre os feldspatos também é óbvio o preenchimento com as agulhas, seguindo a direção da aresta. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	29
Figura 26: Visão geral da amostra, ressaltando os grandes cristais de feldspato alcalino tabulares levemente orientados. ....	29
Figura 27: Nefelina de aparência corroída mantendo a orientação ótica com pequenas inclusões de egirina e cristais de feldspato alcalino. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	29
Figura 28: Feldspatos alcalinos sem geminação múltipla ou, quando presente, incipiente. Piroxênio poiquilitico contendo diversas inclusões de nefelina e feldspato alcalino. Nota-se também a relativa escassez de máfico nessa rocha (quando comparada aos Iujauritos e chibinitos). Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	30
Figura 29: Contatos abruptos, porém irregulares entre nefelinas e feldspatos alcalinos. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	30
Figura 30: Finas agulhas de egirinas puras no contato entre dois cristais de feldspato alcalino, cujas bordas são irregulares. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	30
Figura 31: Fotomicrografia da área corresponde à região na qual foi realizado o imageamento eletrônico. ....	32
Figura 32: Imagens eletrônicas da amostra de chibinito por elétrons retroespalhados e mapas de Fe, Na e Sr. ....	32
Figura 33: Mapas compositionais de Al, Ca, Cl, K, Si e Ti. ....	33
Figura 34: Imagem BSE da amostra de chibinito. ....	34
Figura 35: Composição colorida das imagens de CL da amostra de chibinito. ....	34
Figura 36: Imagem com filtro de cor azul da amostra de chibinito. ....	35
Figura 37: Imagem com filtro de cor vermelha da amostra de chibinito. ....	35
Figura 38: Fotomicrografia correspondente à região escolhida para as análises eletrônicas. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados. ....	37
Figura 39: Imagens eletrônicas da amostra de nefelina sienito por elétrons retroespalhados e mapas de Fe, Na e Sr. ....	37
Figura 40: Mapas compositionais de Al, Ca, Cl, K, Si e Ti. ....	38
Figura 41: Imagem BSE da amostra de nefelina sienito. ....	39
Figura 42: Composição colorida das imagens de CL da amostra de nefelina sienito. ....	39
Figura 43: Imagem com filtro de cor azul da amostra de nefelina sienito. ....	40

Figura 44: Imagem com filtro de cor vermelha da amostra de nefelina sienito.....	40
Figura 45: Fotomicrografia correspondente à região escolhida para as análises eletrônicas.	
Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.....	43
Figura 46: Imagens eletrônicas da amostra de lujaurito por elétrons retroespalhados e mapas de Fe, Na e Sr .....	43
Figura 47: Mapas compostionais de Al, Ca, Cl, K, Si e Ti .....	44
Figura 48: Imagem BSE da amostra de lujaurito. ....	45
Figura 49: Composição colorida das imagens de CL da amostra de lujaurito.....	45
Figura 50: Imagem A com filtro de cor azul da amostra de lujaurito. ....	46
Figura 51: Imagem A com filtro de cor vermelha da amostra de lujaurito.....	46
Figura 52: Fotomicrografia correspondente à região escolhida para as análises eletrônicas.	
Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.....	47
Figura 53: Imagens eletrônicas da amostra de lujaurito por elétrons retroespalhados e mapas de Fe, Na e Ba. ....	47
Figura 54: Mapas compostionais de Al, Ca, Cl, K, Si e Ti.....	48
Figura 55: Imagem BSE da amostra de lujaurito. ....	49
Figura 56: Composição colorida das imagens de CL da amostra de lujaurito.....	49
Figura 57: Imagem B com filtro de cor azul da amostra de lujaurito. ....	50
Figura 58: Imagem B com filtro de cor vermelha da amostra de lujaurito.....	50

## 1. INTRODUÇÃO

A análise textural das rochas é fundamental para a interpretação petrogenética das mesmas. A distribuição das fases minerais e os contatos observados entre elas permitem, de maneira geral, a conclusão das relações temporais entre estes, bem como sugerir, em casos específicos, condições de cristalização e inferir suposições para a história magmática do corpo (como a evolução do líquido, a presença de fatores hidrotermais, etc). Embora as técnicas de microscopia de ótica convencionais sejam fundamentais, apresentam limitações inerentes – como a impossibilidade de quantificar, ou até mesmo identificar, determinadas composições e/ou fases minerais e microestruturas (como zonamentos químicos) e limitações de magnificação, que podem ser insuficientes em determinadas situações como, por exemplo, para identificar sobrecrescimentos de quartzo em uma seção delgada de arenito (Evans et al., 1994; Demars et al., 1996).

A microscopia eletrônica permite alcançar magnificação muito superior à microscopia ótica convencional, com muitas aplicações nas geociências, com destaque para os estudos de texturas, microestruturas e composições das fases minerais. Esta técnica, resultado das interações entre elétrons de um feixe incidente e elétrons dos átomos da amostra, expressas por colisões elásticas e inelásticas entre os mesmos e seu decorrente espalhamento (Reed, 2005), tem sido cada vez mais utilizada em estudos petrográficos e mineralógicos de detalhe (Rae e Chambers, 1988). Este trabalho foca em dois dentre os sinais decorrentes do espalhamento eletrônico, expressos na forma de imagens de catodoluminescência (CL) e de elétrons retroespelhados (em modo composicional, BSE-Compo).

A catodoluminescência analisa a luz emitida por um material devido à excitação prévia de elementos *ativadores*. De forma geral, o fenômeno de luminescência tem tido aplicações no campo da petrografia, da datação de amostras quaternárias e na exploração mineral desde 1965 (Pagel et al., 2000). Em relação à petrologia ígnea, mais especificamente às rochas alcalinas, o método tem sido aplicado com sucesso desde 1975, com os trabalhos pioneiros de Mariano e King (1975) e Mariano (1988). Notadamente, os feldspatos alcalinos têm demonstrado comportamentos de grande interesse geológico, uma vez que a luminescência por eles emitida permite diferenciar fases primárias de fases hidrotermais que interagiram com fluidos de temperaturas mais baixas.

A catodoluminescência não é uma técnica quantitativa e não necessariamente a intensidade de luminescência será proporcional à concentração dos elementos ativadores presentes (Hanchar e Rudnick, 1995). Por outro lado, as imagens de elétrons retroespelhados em modo composicional refletem diretamente os números atômicos médios da região amostrada e têm a capacidade de contrastar significativamente fases minerais com composições distintas (e, portanto números atômicos médios distintos) e/ou diferentes zonas compostionais da mesma fase. Assim, a utilização conjunta de ambas as técnicas é muito

promissora e diversos autores têm obtido sucesso em diferentes estudos, indicando alta confiabilidade para esta combinação (Hanchar e Rudnick, 1995; Pagel et al. 2000).

Nesse cenário, o Corpo Lujaúrítico-Chibinítico do Anel Norte do Maciço Alcalino de Poços de Caldas apresenta-se como um caso interessante para estudos combinados deste tipo, devido ao caráter incomum das rochas que o constituem e, particularmente, das dúvidas existentes quanto à natureza das rochas lujaúríticas. Além disso, alterações texturais e estruturais nos feldspatos alcalinos dessas rochas (que muitas vezes são mistos, com estruturas monoclinicas e triclinicas ocorrendo concomitantemente em um mesmo cristal – Ulbrich, 1983), geralmente tidas como produtos de processos secundários deutérico ou hidrotermal, colocam-se como características muito interessantes a serem estudadas sobre a ótica da catodoluminescência, considerando o padrão de luminescência que os feldspatos geralmente apresentam. Dessa forma, esse trabalho buscou detalhar essas feições através de imageamentos eletrônicos, bem como analisar as respostas luminescentes em outros minerais (como nefelina e sodalita), com o intuito de estudar as microtexturas observadas nos feldspatos e relacioná-las com os demais elementos presentes nessas rochas, de modo a fomentar futuras interpretações petrogenéticas.

## 2. OBJETIVOS

O propósito deste trabalho foi obter uma visão mais detalhada das texturas, particularmente das rochas lujaúríticas e das texturas “em folhas” (Ulbrich, 1984; Gualda, 1998; Ulbrich e Ulbrich, 2000) da segunda geração de piroxênios (tardios) do Corpo Lujaúrítico-Chibinítico do Anel Norte do Maciço Alcalino de Poços de Caldas e sua relação textural com os minerais félsicos primários (feldspato alcalino, principalmente) através da obtenção de imagens eletrônicas utilizando as técnicas de catodoluminescência e elétrons retroespelhados e, com isso, verificar a validade da hipótese petrogenética de Gualda (1998) para a cristalização tardia- a pós-magmática dos lujaúritos. Adicionalmente, esse trabalho propôs analisar as respostas obtidas pela nefelina e zeólitas na catodoluminescência. Em síntese, o presente trabalho procura expandir a análise textural deste tipo de rochas com novos métodos e contribuir para o conhecimento sobre a gênese das rochas lujaúríticas.

## 3. JUSTIFICATIVA

Por seu caráter textural único e por representar rochas relativamente raras no mundo, a ocorrência alcalina em Poços de Caldas, mais especificamente o Corpo Lujaúrítico-Chibinítico, é de inegável interesse geológico, justificando a extensa literatura disponível para o mesmo (ver revisão em Ulbrich et al., 2005). No âmbito petrogenético existem duas teorias diferentes para origem do corpo: uma que assume uma origem magmática para os lujaúritos (Ulbrich, 1984; Ulbrich e Ulbrich, 2000) e outra que pressupõe uma ação hidrotermal para a geração do líquido lujaúrítico (Gualda, 1998). As análises texturais por imageamento

eletrônico (BSE-Compo e particularmente CL) propostas nesse trabalho representam estudos inéditos, com potencial de complementar não apenas as pesquisas prévias no que diz respeito aos processos genéticos relacionados ao corpo, mas também de incrementar a literatura dos métodos utilizados, especialmente no que diz respeito à exploração das imagens de catodoluminescência para estudos texturais de nefelina e zeólitas, para as quais são escassas as referências disponíveis.

#### 4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

O Maciço Alcalino de Poços de Caldas corresponde a uma estrutura vulcânica circular localizada na cidade homônima, na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo (figura 1). O Corpo Lujaurítico-Chibinítico corresponde a uma área de ocorrências agpaíticas na parte norte, externa à estrutura anelar (ver figura 2), onde se encontra a Pedra Balão, um ponto turístico regional.

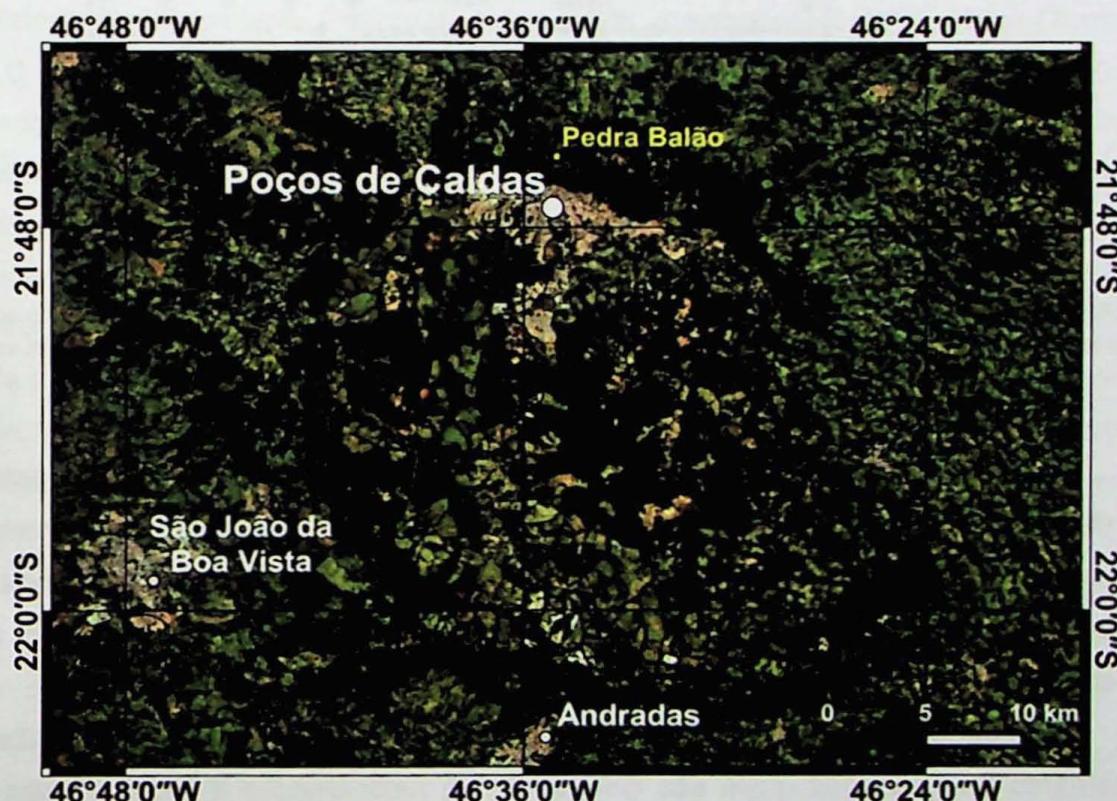


Figura 1: Localização da cidade de Poços de Caldas e da Pedra Balão, com estrutura anelar visível na imagem de satélite (Google Earth, 2016).

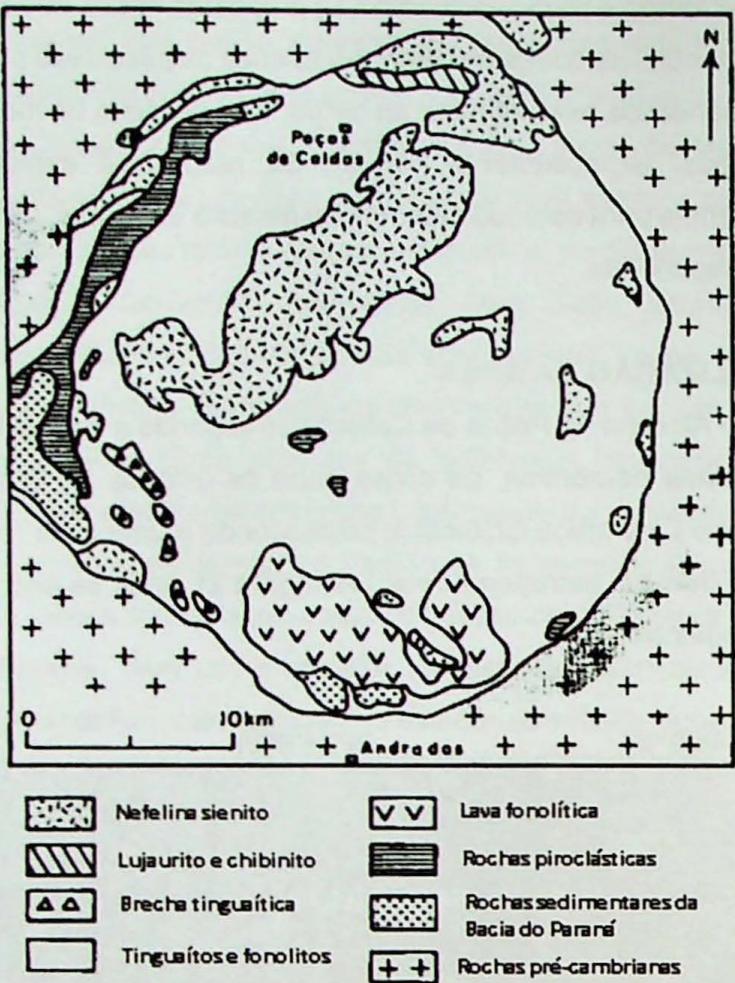


Figura 2: Mapa geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. O Corpo Lujaurítico-Chibinítico corresponde a área rachurada no extremo norte da estrutura (ver legenda na própria figura). (Modificado de Ellert et al., 1959)

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho envolveu, inicialmente, etapas de levantamentos bibliográficos para familiarização com os temas abordados e métodos utilizados. Estas etapas consistiram na elaboração de uma breve síntese sobre o estado atual de conhecimento do corpo Lujaurítico-Chibinítico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas e na sistematização de alguns fundamentos e aplicações das técnicas de imageamentos BSE-Compo e CL.

Em seguida, o projeto incluiu etapas de seleção de amostras, análises laboratoriais e tratamento de dados, as quais são discutidas em maior detalhe a seguir. Todas as etapas analíticas foram efetuadas em laboratórios do Núcleo de Apoio à Pesquisa (NAP) GeoAnalítica-USP.

### 5.1. Seleção de amostras para estudo

Foram selecionadas amostras e seções delgadas provenientes de trabalhos prévios conduzidos por Ulbrich (1984) e Gualda (1998), disponíveis na coleção do orientador. Merece ser destacado que não há correspondência exata entre algumas das amostras macroscópicas e seções utilizadas, uma vez que algumas amostras não foram localizadas ou foram

consumidas para outros tipos de estudos. Nestes casos, as descrições macroscópicas foram efetuadas em amostras similares, coletadas em áreas muito próximas.

No total foram estudadas oito seções delgadas, quatro delas correspondentes ao Lujaurito I (P-223a, P-223b, PB-011, PB-012), três ao Chibinito (PC-01B, PC-01'B, PC-015D) e uma ao Nefelina Sienito Traquitóide II (PC-03C). As amostras não possuem precisão de localização adequada, uma vez que foram coletadas há muitos anos por Ulbrich (1984). Dentre estas, após a etapa petrográfica, foi selecionada uma variedade de cada tipo para as análises de microscopia eletrônica.

## 5.2 Atividades laboratoriais

As análises petrográficas foram realizadas em seções delgado-polidas convencionais com espessuras de 30 $\mu\text{m}$ , utilizando as técnicas tradicionais de luzes transmitida e refletida no Laboratório de Microscopia Petrográfica, utilizando o microscópio petrográfico Olympus BXP-40. O imageamento das texturas e micro-estruturas foi efetuado em microscópio Zeiss AXIO Imager.Azm que possui câmera fotográfica específica acoplada. As análises petrográficas visaram por um lado a familiarização com estas rochas e por outro complementar as descrições apresentadas por Gualda (1998), focando especificamente as texturas das fases félsicas; adicionalmente foram embasamento para as análises efetuadas de microscopia eletrônica.

Os imageamentos BEI-Compo e CL foram efetuados no Laboratório de Microssonda Eletrônica, utilizando a microssonda JEOL JXA-FE-8530, provida com canhão *field emission*, que permite elevada resolução espacial, cinco espectrômetros de dispersão de comprimentos de onda (WDS) e um espectrômetro de dispersão de energia (EDS). As condições analíticas para os imageamentos BSE e CL foram 15 kV e 20 nA (em um caso CL, 34 nA) para a voltagem de aceleração da coluna e corrente do feixe eletrônico, respectivamente. A resolução das imagens foi mantida no intervalo entre 1 e 2  $\mu$  de para a dimensão linear de cada pixel.

As imagens BSE foram obtidas previamente e são representadas em 256 tons de cinza. As imagens CL foram obtidas utilizando fotomultiplicador R995P e unidade de fotocontagem C9744MOD do sistema CL da microssonda. As contagens são acumuladas no espectrômetro 5, regulado para valores mínimos de ganho do analisador de voltagem de pico (PHA), colocado em modo diferencial (base em 3 V e janela de 7 V) e voltagem de bias do respectivo detector. Paralelamente, os espectrômetros 1, 2, 3 e 4 foram sintonizados nas posições de Na, Fe, Sr e Ba, permitindo obter simultaneamente imagens de raios X (WDS) destes elementos; as quais se somaram imagens para Si, Ti, Al, Cl, K e Ca obtidas também simultaneamente por EDS. Para ressaltar as feições de interesse nas imagens CL, foram

utilizados filtros azul e vermelho, com 25,4 a 31,8 mm de diâmetro e entre 3 e 7 mm de espessura, para destacar os comprimentos de onda correspondentes às cores desejadas.

### 5.3 Tratamento dos dados

As fotomicrografias obtidas ao microscópio foram examinadas e tratadas utilizando os programas Inkscape e GIMP 2.8.14 de livre circulação. As imagens eletrônicas foram editadas através do programa ImageJ, também de livre circulação, para ressaltar os aspectos de maior interesse para os objetivos propostos. Com auxílio deste programa foram computadas composições coloridas combinando as imagens de comprimentos de ondas correspondentes às cores azul e vermelho.

## 6. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA

### 6.1 O Maciço Alcalino de Poços de Caldas

O Maciço Alcalino de Poços de Caldas está inserido em um contexto cratônico na borda da Bacia do Paraná e da Serra da Mantiqueira, em um embasamento cristalino granítico-gnássico (Ellert, 1959) pré-cambriano recoberto por arenitos e siltitos da formação Botucatu (Bjornberg, 1959). Resíduos dessa cobertura são identificados em diversas partes internas do maciço (Bushee, 1971). Morfológicamente, o maciço mostra uma forma anelar de aproximadamente 800 km<sup>2</sup>, resultante do colapso de uma caldera (Bushee, 1971; Ulbrich, 1983). Composicionalmente é constituído principalmente por rochas miasquíticas, como fonolitos e tinguaítos, e, subordinadamente, nefelina sienitos (Bushee, 1971), sendo que estes últimos podem ser encontrados (embora em proporções menos expressivas) em variedades agpaíticas (Gualda, 1998; Ulbrich e Ulbrich, 2000). As rochas agpaíticas, de fato, representam corpos显著mente menores (<5 km<sup>2</sup>) dentro do contexto do maciço e tendem a estar associadas com nefelina sienitos miasquíticos (Ulbrich, 1984).

Amaral et al. (1967) datou por K-Ar a idade da colocação de tinguaítos e nefelina sienitos pertencentes ao maciço como entre 80 e 63 Ma, refutando a hipótese já bem aceita entre os geólogos de que a intrusão dessas rochas, bem como de outras suítes alcalinas brasileiras contemporâneas, está relacionada aos eventos da abertura do Atlântico Sul. Bushee (1961) identificou idades K-Ar entre 63 e 60 Ma para os nefelina sienitos e lujauritos, 76-72 Ma para os tinguaítos e 75 Ma para os fonolitos, concluindo assim que a intrusão magmática do Maciço Alcalino de Poços de Caldas deveria ter começado por volta de 81-80 Ma e encerrado em cerca de 50 Ma. Ulbrich et al (2002) apresentam alguns dados novos e revisam criticamente os dados disponíveis, particularmente os obtidos com datações K-Ar em rocha total, e apontam que as idades mais prováveis de cristalização magmática dos nefelina sienitos, tinguaítos e fonolitos devem se situar entre 83 e 78 Ma.

### 6.1.1 O Corpo Lujaurítico-Chibinítico do Anel Norte

O Corpo Lujaurítico-Chibinítico foi dividido por Bushee (1971) em três unidades faciológicas diferentes: um lujaurito, um nefelina sienito (subdividido em três subunidades) e um eudialita-nefelina sienito.

Ulrich (1984) mapeou a área em maior detalhe (Figura 3), dividindo o corpo em cinco unidades e considerando uma das unidades do nefelina sienito de Bushee parte dos nefelina sienitos cinzas miasquíticos. De acordo com o trabalho, no centro do corpo encontra-se um lujaurito (LUI) de granulação grossa, contornado por outro lujaurito (LUL) mais fino, duas diferentes variedades de nefelina sienitos também diferenciadas pela granulação (Nefelina Sienito I foi descrito como granulação fina e Nefelina Sienito II, grossa) e um chibinito maciço, com aspecto traquitoide. Dentre estas variedades, os chibinitos são as rochas de maior ocorrência (representando entre 70 e 80% do corpo), seguidos pelos Lujauritos I (cerca de 20 a 30%). As demais unidades (LII, NeSi I e II) representariam, de acordo com o mesmo trabalho, as fácies de borda das duas dominantes.

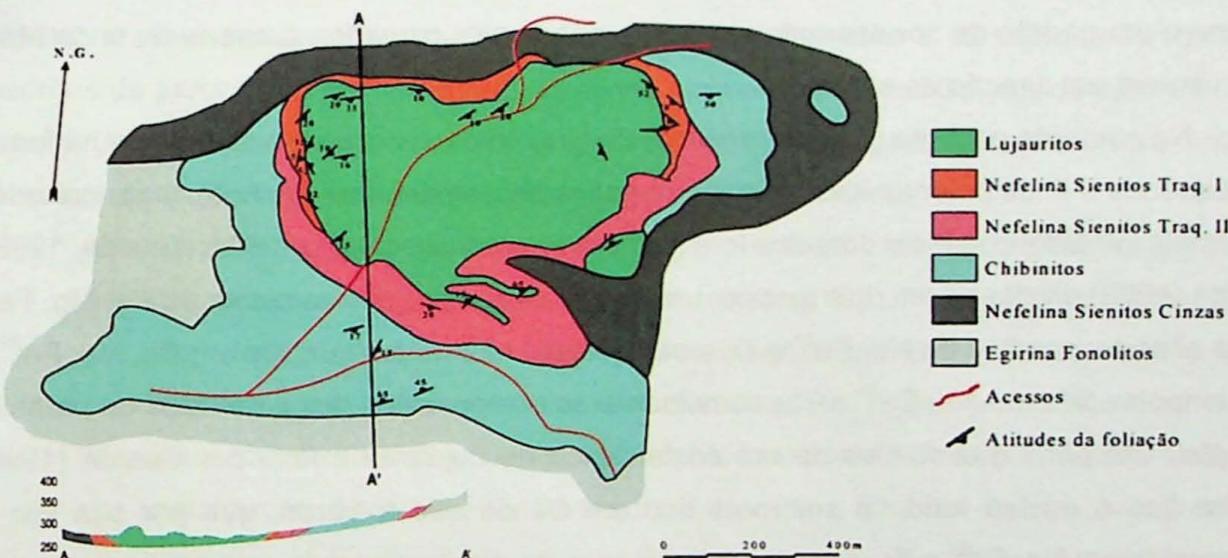


Figura 3: Mapa das fácies do Corpo Lujaurítico-Chibinítico (Ulrich, 1984).

A mineralogia das cinco fácies é similar (Bushee, 1971; Gualda, 1998; Ulrich e Ulrich, 2000). As rochas exibem, majoritariamente, feldspato alcalino tipicamente tabular, nefelina (com algumas variedades ricas em ferro; Ulrich, 1983), sodalita, piroxênio sódico (egirina) e eudialita (principal acessório, indicador do caráter agpaítico da rocha), acompanhados em quantidades variáveis por diversos minerais acessórios mais ou menos raros (e.g., astrofilita, rinkita-rincolita, lamprofilita, hainita, pectolita-serandita, cf. Ulrich et al., 2005). Dentre esses, ressalta-se que o piroxênio representa, pelo menos, duas gerações distintas – uma primária e outra tardia- a pós-magmática. A primeira geração é formada por cristais tipicamente poiquilíticos (com “inclusões” de feldspato alcalino e nefelina), caracterizando a denominada *textura chibinítica*, que ocorrem particularmente nos chibinitos e estão tipicamente ausentes nos NeSi I e nas duas formas de lujauritos. A outra geração é formada por cristais idiomórficos muito alongados, prismáticos a aciculares, que se agregam

em "folhas" sem orientação linear (Ulbrich, 1984), mais característica dos Lu I e Lu II e dos NeSi I (e encontrada de forma menos expressiva nos chibinitos). Esta última tem sido considerada pós-magmática devido à associação com produtos de alteração de nefelina e feldspato (Gualda, 1998). Essas folhas têm uma aparência "fluida" em torno do feldspato alcalino e da nefelina, embora seja notável que diversos cristais adentrem a área da borda dos minerais citados, corroendo-as (Gualda, 1998).

No caso da primeira geração (sin-magmática), os piroxênios ainda dividem-se em duas zonas: a primeira a ser formada com forte pleocroísmo (verde a bege) e representativa da fase "*cumulus*" dentro do contexto de textura intercumulática (com feldspato alcalino e nefelina nos interstícios) e a segunda um sobrecrescimento tardio, com pleocroísmo fraco (bege), cortando nefelina e feldspato alcalino (Gualda, 1998). De acordo com o mesmo autor, a primeira zona é enriquecida na porção central em Ca, Mg, Mn, Fe<sup>2+</sup> e Zr e, após um contato brusco (indicando que o núcleo é primitivo) há variações químicas graduais, como o aumento de Na, Fe<sup>3+</sup>, Ti e Al e a redução de Ca, Mg, Mn, Zr e Fe<sup>2+</sup>. Já na zona periférica, o autor descreve um padrão de zoneamento com pelo menos seis camadas sucessivas, onde Mn e Al diminuem em direção ao centro.

Na segunda geração (pós-magmática) de piroxênios, os cristais aparecerem na forma de pequenos e finos prismas idiomóficos alongados de aegirina (ou agulhas), tanto cortando os demais minerais como em contatos intergranulares e em descontinuidades (Gualda, 1998). Gualda (1998) dividiu-os em dois grupos: um caracterizado por baixos teores de Ca, Mg, Fe<sup>2+</sup> e Zr e altas proporções de Na, Fe<sup>3+</sup> e Ti; e outro relativamente enriquecido em Ca, Mg, Fe<sup>2+</sup> e Zr e empobrecido em Na, Fe<sup>3+</sup> e Ti - semelhante às composições dos piroxênios de primeira geração. Um perfil quantitativo de um cristal típico de Lujaurito II feita por Gualda (1998) mostra que o núcleo tende a ser mais rico em Ca do que a borda, que por sua vez é enriquecida em Na, Fe<sup>3+</sup> e Ti.

Os feldspatos alcalinos destas rochas têm sido descritos estruturalmente como ortoclásios e microclínios com triclinicidades variáveis (Ulbrich, 1983; Ulbrich, 1993). Zonamentos químicos foram reconhecidos nos feldspatos alcalinos do Lu I (de granulação mais grossa), bem como nos chibinitos (neste caso, apresentando núcleo mais rico em Na); cristais mais homogêneos são mais típicos no Lu II e em ambos os nefelina sienitos (Ulbrich, 1983). Em todas as variedades do corpo, bem como na maioria dos nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, identifica-se uma geminação múltipla (cujo aspecto geral lembra o da típica geminação em grade do microclínio) em feldspatos geralmente turvos (de aspecto algo "sujo"), que pode ocorrer na totalidade ou parcialmente nos grãos e em diferentes níveis de intensidade (geminação incipiente, pobre, boa), sendo que mais de um nível pode ser encontrado na mesma rocha (Ulbrich, 1983; Ulbrich, 1993). Essas zonas geminadas, frequentemente observadas em áreas turvas nos cristais, possuem limites pouco precisos e são reconhecidas ao microscópio pelas variações nas posições de extinção (Ulbrich, 1983).

Ulbrich (1993) ressalta que nos Nefelina Sienitos (I e II) e nos Lujauritos II predomina esta geminação é ausente ou apenas incipiente, enquanto que nos Lu I e chibinitos predomina a geminação pobre, localmente observando-se geminações incipiente e boa. Este tipo de geminação está associado a uma mudança estrutural dos feldspatos alcalinos, que passam de monoclinico (ortoclásio), tipicamente primários, à triclinico (microclínio), geralmente de temperaturas mais baixas. Segundo Ulbrich (1983, 1993) os feldspatos alcalinos não geminados ou com geminação incipiente apresentam padrões difratométricos predominantemente monoclinicos, enquanto que os com geminação em intensidades pobres a boas apresentam padrões de microclínios intermediários; estas transformações estariam associadas a processos secundários, relacionados a eventos de percolação de fluidos deutéricos.

Diferentes hipóteses foram propostas para explicar a origem do corpo, as relações estruturais observadas entre as fácies petrográficas mapeadas, a origem das foliações magmáticas, a ausência (ou escassez) de eudialita e egirina (e outros máficos) nos nefelina sienitos e as evidências de recristalização mais tardia, tal como a variação observada nos padrões de geminação dos feldspatos alcalinos, acima destacada. De acordo com Ulbrich e Ulbrich (2000), estes aspectos são incompatíveis com uma gênese baseada unicamente na cristalização fracionada com controles por densidade e gravidade.

Ulbrich (1984) propôs três possibilidades para explicar a origem dessas rochas:

- 1) Duas injeções magmáticas separadas: magmas lujaurito e chibinito, gerados de forma independente. Nessa hipótese o magma lujaurito seria o primeiro a ser colocado; as suas bordas de cristalização mais precoce teriam sido metassomatizadas por fluidos provenientes da zona interna da câmara ainda em cristalização. Após esse fenômeno teria ocorrido a intrusão do magma chibinítico;
- 2) O magma chibinítico teria se cristalizado antes do lujaurítico, que por sua vez representaria um líquido residual do primeiro. O contato entre os dois magmas (Lujaurito II, Nefelina Sienitos I e II) representaria uma borda quente, resultante da perda de voláteis, metamossatizada pelos fluidos concentrados após a cristalização das fases principais;
- 3) O magma lujaurítico é derivado do magma chibinítico, porém em dois estágios diferentes. Após a cristalização de feldspato alcalino, egirina-augita e nefelinas, o líquido se tornaria rico em Ca. Esse magma residual teria interagido com "líquidos deutéricos" (ricos em elementos traços) e com líquidos intersticiais, enriquecendo os bolsões magmáticos em Na, Fe e elementos traços, culminando na geração de um líquido lujaurítico.

Em uma hipótese posterior, Ulbrich e Ulbrich (2000) consideram que a geração do corpo teria se dado através de um processo contínuo, iniciado pela intrusão de um magma chibinítico fortemente agpáitico. Parte desse magma ficou aprisionada sob uma capa quente

de tinguaíto encaixante e foi enriquecida em voláteis, Na, Fe, Mn e metais raros. No contato desse magma enriquecido com a encaixante, foi gerado um envelope de contato, concentrando os voláteis no núcleo da estrutura. Esse envelope cristalizou o que corresponde aos Lujauritos II (fácies mais fina) e o núcleo originou os Lujauritos I (fácies de granulação mais grossa). Enquanto isso, o restante do magma chibinítico seguiu se colocando sob a capa lujaurítica, forçando sua entrada e alargando a câmara magmática inicial. Os nefelinas sienitos foram gerados também como um envelope de contato, mas neste caso, entre os líquidos chibinítico e lujaurítico.

Gualda (1998) propõe, por sua vez, que o corpo foi formado por pelo menos dois estágios principais: um magmático (no qual teriam cristalizado os feldspatos alcalinos, nefelinas, máficos e acessórios, incluindo a primeira geração de piroxênios, com padrões de zoneamentos concêntricos graduais e com aspecto poiquilitico) e um pós-magmático (onde teriam se cristalizado zonas periféricas dos cristais da primeira geração de piroxênio, além da segunda geração completa, lamprofilita) pela atuação de metassomatismo rico em elementos tais como Ti, Nb, Mn e Sr. A primeira fase corresponderia à invasão do magma chibinítico e, derivado deste (pela extração de egirina, feldspato alcalino e nefelina), seria gerado o magma que cristalaria nefelina sienitos. Os fluidos residuais hidrotermais do primeiro magma corresponderiam à fase metassomática, que por sua vez teria gerado os lujauritos, modificando a paragênese original nos nefelina sienitos e cristalizando piroxênios aciculares e lamprofilita, em uma textura de *folhas* (lujaurítica) que se encaixa entre os cristais tabulares de feldspato alcalino, realçando o aspecto foliado que a rocha já tinha previamente (pela orientação dos feldspatos alcalinos tabulares).

## 6.2 Interações de elétrons com a matéria

A microscopia eletrônica é uma técnica baseada nos diferentes sinais que resultam da incidência de um feixe de elétrons em uma amostra sólida (Figura 4) que produz interações entre os elétrons incidentes e os elétrons dos orbitais dos átomos presentes na amostra. Esta interação se dá essencialmente por colisões entre elétrons que resultam em espalhamento de elétrons que colidiram e/ou sofreram colisões.

As colisões podem ocorrer de forma denominada elástica (em que elétrons incidentes colidem sem perder parte significativa de sua energia inicial, alteram suas trajetórias e eventualmente retornam da amostra, por isto denominados elétrons retroespelhados) ou de forma inelástica (em que as energias dos elétrons incidentes são parcial ou totalmente transferidas para os elétrons da amostra que sofreram as colisões); estes geram os denominados elétrons secundários e elétrons Auger, além de raios-X característico e catodoluminescência, entre outros, cf. Goldstein et al. (1981). Estes sinais emitidos pela amostra são representados esquematicamente na Figura 4. Os sinais correspondentes aos

eletrons retroespalhados e de catodoluminescência, de importância para este trabalho, são discutidos com algum detalhe adicional a seguir.

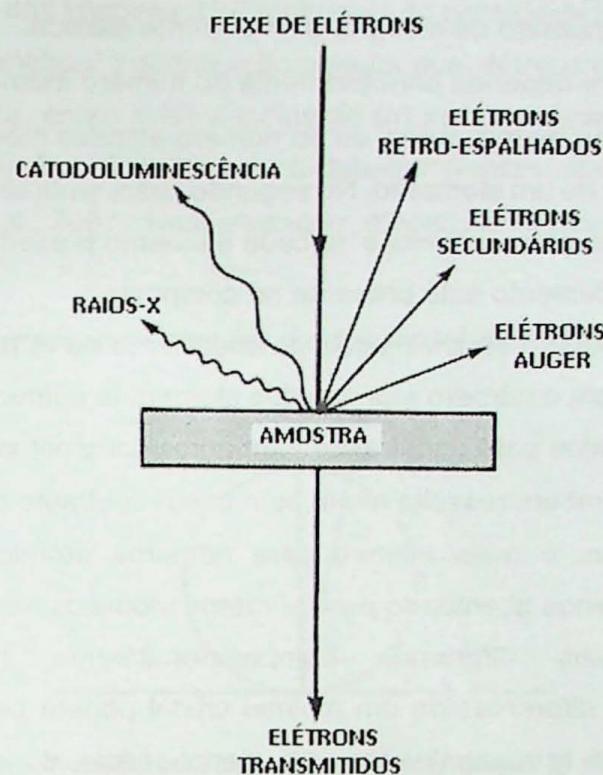


Figura 4: Interações obtidas pela incidência de um feixe de elétron em uma amostra – raios-x, catodoluminescência, elétrons retroespalhados, elétrons secundários, elétrons auger, elétrons transmitidos.  
(Modificado de Yacobi e Holt, 1990)

#### 6.2.1 Elétrons retroespalhados

Elétrons retroespalhados (Backscattering electrons - BSE) correspondem à fração de elétrons que, ao colidir elasticamente com os elétrons dos átomos da amostra, alteraram suas trajetórias de forma significativa de forma a retornarem da amostra e poderem ser detectados dentro da câmara do microscópio ou da microssonda eletrônica. Através da varredura do feixe eletrônico incidente, pode-se obter imagens destes elétrons integrando as interações pontuais em uma área pré-definida.

Estas imagens podem ser geradas em dois modos contrastados: COMPO, que ressalta contrastes compostionais e TOPO, que ressalta contrastes de relevo ou topográficos. De fato, a intensidade dos elétrons retroespalhados reflete tanto a composição quanto a topografia da amostra e, na prática, utiliza-se dois detectores BSE em forma de semi-anel os quais permitem ressaltar os efeitos compostional ou topográfico, somando-se ou subtraindo-se os sinais nele detectados (Goldstein et al., 2007). Os efeitos compostionais são naturalmente os mais relevantes para este trabalho.

A razão entre o número de elétrons retroespalhados (ou corrente retroespalhada) e o número de elétrons (ou corrente) do feixe incidente ( $B$ ) é definida como coeficiente de retroespalhamento ( $\eta$ ):

$$\eta = n_{e(BSE)} / n_{e(B)} = i_{(BSE)} / i_{(B)}$$

Eq. 1

Em que  $n_e$  = número de eletrons e  $i$  = corrente elétrica.

O coeficiente  $\eta$  depende principalmente do número atômico ( $Z$ ) no caso de elementos químico simples, como metais puros, ou do número atômico médio ( $\bar{Z}$ ) no caso de amostras constituídas por mais de um elemento. No segundo caso, o número atômico médio é calculado pela somatória dos números atômicos de cada elemento presente ponderada pela fração em peso com que este elemento está presente no composto.

Na Figura 5, ilustra-se a variação do coeficiente de retroespalhamento que aumenta monotonicamente com o número atômico dos elementos químicos e ressalta o potencial dos elétrons retroespalhados para contrastar elementos/compostos com diferentes valores de  $Z$  ou  $\bar{Z}$ . Esta Figura também ressalta muito bem que o contraste composicional entre pares de elementos adjacentes é mais intenso para números atômicos menores e tornando-se progressivamente menos acentuado para números atômicos maiores.

Assim, cristais diferentes composicionalmente homogêneos e/ou zonas composicionalmente diferentes de um mesmo cristal podem ser facilmente destacados em imagens de elétrons retroespalhados, em dependência do efeito que as combinações compostacionais exercem nos coeficientes de retroespalhamento.

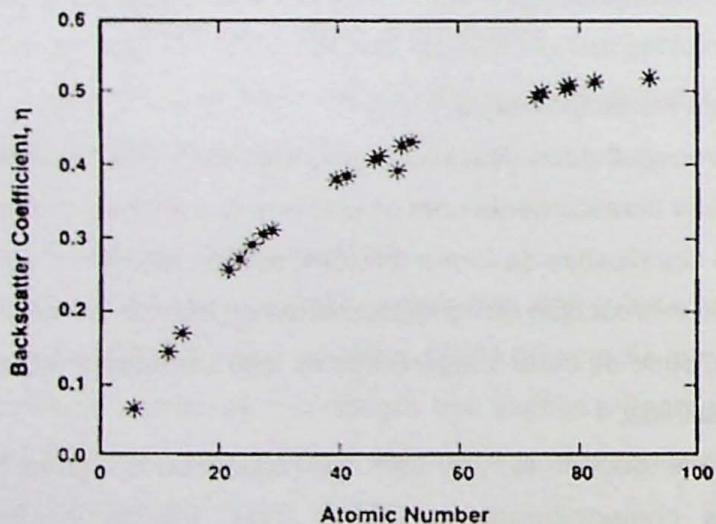


Figura 5: Variação do coeficiente  $\eta$  em relação ao número atômico ( $Z$ ) para  $E_0 = 20$  keV (energia dos elétrons incidentes). (Heinrich, 1996, apud Goldstein, 2007).

O coeficiente  $\eta$  depende subordinadamente, muito pouco na prática, da energia do feixe incidente ( $E_0$ ) e do ângulo de incidência do feixe eletrônico sobre a amostra (para detalhes, ver Heinrich, 1996 e Goldstein et al., 2007 entre outros). No primeiro caso, por exemplo, para valores  $5 \leq E_0 \leq 50$  keV, típicos das condições empregadas em microscópios eletrônicos de varredura e microssondas eletrônicas, as variações são inferiores a 10 %; no segundo caso, relevante apenas para microscópios eletrônicos portadores de platina de

amostra com opção para rotação, o coeficiente de retroespalhamento é máximo para incidências normais à amostra.

Para a compreensão das imagens BSE é necessário considerar também a distribuição do espalhamento, isto é, quantificar a distribuição angular dos elétrons retroespalhados. Se a amostra não estiver inclinada, então o feixe incidente ( $n$ ) será coincidente com a normal e, como demonstrado na Figura 6, o ângulo entre o detector (representado pelo vetor  $m$ ) e a normal será  $\Phi$  (Goldstein et al., 2007). Nesse cenário, o coeficiente  $\eta$  será dado por:

$$\eta(\theta) = \eta_n \cos(\theta) \quad \text{Eq. 2}$$

Em que na qual  $\eta_n$  corresponde ao valor medido ao longo da normal.

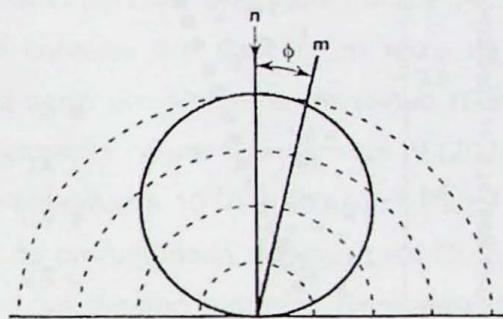


Figura 6: Distribuição do retro-espalhamento para amostras planas em relação ao ângulo ( $\Phi$ ) entre o feixe incidente ( $n$ ) e o vetor do detector ( $m$ ). (Goldstein et al., 2007).

Goldstein et al (2007) mostram também o máximo número de elétrons retroespalhados é encontrado na direção da normal, isto é, na mesma direção do feixe de incidência ( $\Phi=0^\circ$ ). Quanto maior o valor de  $\Phi$ , menor será a quantidade de BSE. Por exemplo, quando  $\Phi=45^\circ$ , a intensidade do retro-espalhamento será em torno de 70% e para  $\Phi=60^\circ$ , a intensidade será 50%. Nas microssondas eletrônicas em geral, os detectores semi-anelares dedicados estão dispostos ortogonalmente e “bordejando” o feixe eletrônico incidente, de forma que  $\theta$  tem valor bem baixo.

Outro aspecto importante para as análises de imagens diz respeito a profundidade de geração do sinal emitido que é detectado e constitui as imagens. A profundidade que os elétrons do feixe conseguem adentrar na amostra depende da composição e, portanto, dos números  $Z$  ou  $\bar{Z}$  e da estrutura (particularmente do empacotamento atômico). Normalmente é expressa pelo parâmetro *electron range* ( $R_{K0}$ ), dado pela equação de Kanaya e Okyamo (1972) na forma:

$$R_{K0} = 0,0276AE_0^{1,76}/(0,889\rho Z) \mu\text{m} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que  $E_0$  é a energia do feixe de elétrons em KeV,  $A$  é o peso atômico da amostra em  $\text{g/mol}^{-1}$ ,  $\rho$  é a densidade em  $\text{g/cm}^{-3}$  e  $Z$  é o número atômico. O parâmetro é dado em  $\mu\text{m}$ . A título de exemplo, ilustra-se na Figura 7 a variação cumulativa do coeficiente de

retroespalhamento normalizado para alguns elementos químicos puros com variações significativas de  $Z$  (Newbury e Myklebust, 1991). Esta Figura ilustra que para elementos muito leves, como o C, são detectados eletrons retroespelhados provenientes de profundidades até ca.  $0,4 \mu\text{m}$ , enquanto que para elementos mais pesados, como o Au, apenas as profundidades inferiores a ca.  $0,25 \mu\text{m}$  contribuem significativamente para o retroespalhamento.

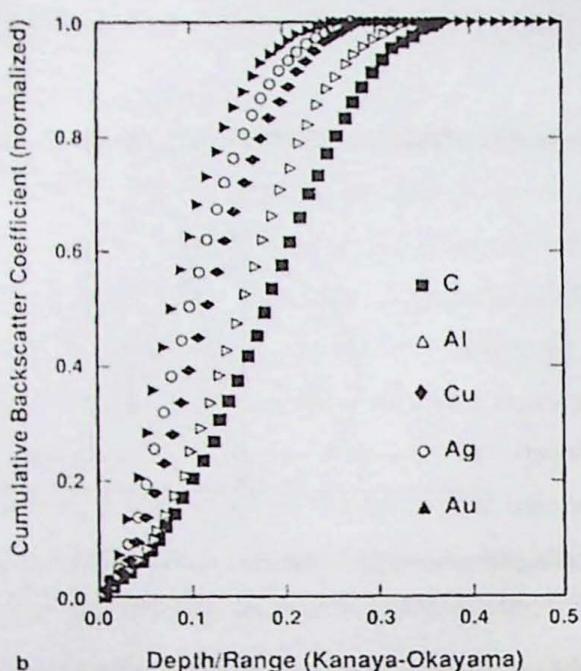


Figura 7: Profundidade atingida na amostra pelos elétrons antes do espalhamento para diferentes elementos. A profundidade ( $\mu\text{m}$ ) está em relação a  $R_{K0}$  e o coeficiente de retro-espalhamento está normalizado.

### 6.2.2 Catodoluminescência

A catodoluminescência (CL) é o fenômeno de emissão de luz por um material previamente excitado através do bombardeamento de um feixe de elétrons em condições de vácuo (e.g., Martins et al., 2007). A luz pode ser emitida com diferentes intensidades e em diferentes comprimentos de onda, desde a radiação infravermelha até a ultravioleta, em dependência do tipo de material estudado e de impurezas nele presentes (Marshall, 1988).

A técnica de imageamento CL tem ganho notoriedade nos últimos anos porque permite não apenas a separação quantitativa e qualitativa de fases minerais, como também o reconhecimento de zonamentos compostionais e transformações diversas na mesma fase, além de auxiliar na descrição e interpretação de relações texturais entre diferentes fases minerais (Pagel et al., 2000). De fato, o método consegue fornecer informações adicionais não bem evidenciadas com petrografia ou imagens eletrônicas convencionais e, por exemplo, tem sido aplicado de forma sistemática como suporte fundamental para datações pontuais com SHIRMP ou LA-MC-ICPMS de cristais de zircão, devido ao seu potencial para revelar as estruturas internas neste mineral (Corfu et al., 2003).

A instrumentação para análise de CL pode ter configurações bem distintas; desde equipamentos específicos para geração do feixe eletrônico acoplados a uma platina selada com vácuo que permite visualização e documentação *in situ* dos efeitos em um microscópio óptico e espectrômetro óptico que permite examinar em detalhe os comprimentos de onda a luz emitida (Pagel et al., 2000) até os sistemas mais simples acoplados diretamente em microscópios e/ou microssondas eletrônicas. Nestes últimos equipamentos, as imagens obtidas são de resolução significativamente melhor, o que permite o trabalho com materiais emitância mais reduzida de luz (Gotze e Kempe, 2008), entretanto as imagens são obtidas apenas em 256 tonalidades de cinza e, para diferenciar diferentes cores, torna-se necessário a utilização de filtros que absorvem intervalos pré-determinados de comprimento de onda.

O método basicamente consiste em aplicar um feixe de elétrons à uma lâmina delgado-polida revestida por carbono em ambiente de vácuo (Gotze e Kempe, 2008). Os elétrons são gerados pelo aquecimento de um filamento de W (2000-3000°C) e as correntes tipicamente utilizadas se situam próximas a  $10^{-7}\text{A}$  (100 nA, cf. Pagel et al., 2000). Na Figura 8 apresenta-se uma comparação da profundidade atingida pela CL com o  $R_{k0}$  mencionado no item anterior (Equação 4), para um mesmo material. Comparativamente ao imageamento BSE, vale a pena destacar que a profundidade amostrada pela CL é inferior, raramente ultrapassando 3-5  $\mu\text{m}$  em amostras de minerais silicáticos ou carbonáticos.

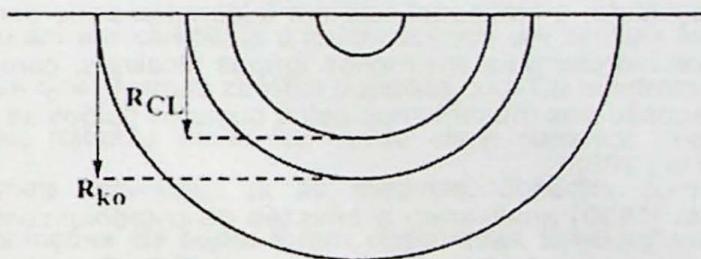


Figura 8: Profundidade atingida pelos elétrons na amostra ( $R_{CL}$ ) em comparação com o padrão  $R_{k0}$  (Remond et al., 2000).

A catodoluminescência é uma ferramenta muito útil o estudo do grupo dos feldspatos, na interpretação das possíveis condições de formação e das suas alterações posteriores (Marshall, 1988), uma vez que os cristais representativos de gerações primárias em diferentes rochas ou tardias/secundárias devem emitir luminescências diferentes (mostrando seja variações de cor, seja de intensidade), em dependência das condições e dos ambientes de cristalização (Gotze et al., 2000). As variações mais notáveis nos efeitos de luminescência são devidas à presença de defeitos cristalinos na estrutura e/ou à presença de elementos traços *ativadores* - impurezas que ocorrem em nível de traços no mineral - que possibilitam não apenas a diferenciação da composição dos cristais (como por exemplo, distinguir plagioclásio de feldspato alcalino), mas também o rápido reconhecimento de diferentes gerações do mesmo mineral.

Em feldspatos alcalinos associados a rochas ígneas alcalinas, a catodoluminescência tende a ter comprimentos de ondas que variam do azul ao vermelho (Brooks et al., 2002), mas não há muito consenso sobre a origem dessas cores. A cor azul tem sido atribuída como característica dos feldspatos que apresentam defeitos nas estruturas cristalinas (Gotze et al., 2000), mas também tem sido mencionada na literatura como uma resposta a presença de  $Ti^{+4}$  (Mariano, 1988),  $Eu^{2+}$  (Mariano e King, 1975),  $Ga^{3+}$  (De St Jorre e Smith, 1990) e à variação das densidades dos defeitos estruturais de  $Al-O^-A$  (Marfunin e Bershov, 1970, *apud* Gotze, 2009). Já a luminescência vermelha tem sido atribuída a presença de  $Fe^{3+}$  (Rae e Chambers, 1988), apesar de alguns feldspatos ricos em Ferro não exibirem essa cor (Finch e Klein, 1999).

Mariano (1976), o primeiro pesquisador a aplicar CL para estudar o metassomatismo alcalino, teve a percepção de que feldspatos não metassomatisados tendem a exibir uma luminescência azul, enquanto aqueles que sofreram alteração mostram CL vermelha. O trabalho acrescenta ainda que a presença de  $Fe^{3+}$  nestes últimos provém do fluido metassomático.

Finch e Walker (1991) notaram que a luminescência azul em feldspatos alcalinos está associada a microporos de menores dimensões do que os de CL vermelha e concluíram que este fato corrobora a hipótese de Mariano (1976), uma vez que os fluidos hidrotermais percolariam pelos poros, portanto os cristais de maiores poros seriam, de fato, os mais alterados. Como resultado, a luminescência em feldspatos pode ser usada para rastrear a passagem de fluidos hidrotermais em rochas ígneas alcalinas, com potencial para auxiliar também na compreensão dos mecanismos pelos quais os fluidos se movimentam na crosta terrestre (Brooks et al., 2002).

Finch e Klein (1999) analisaram a emissão de catodoluminescência nos feldspatos alcalinos da província ígnea alcalina de Gardar, no sul da Groenlândia. Foram analisados picritos, granitos alcalinos e nefelina sienitos, alguns de composições agpaíticas, com alterações hidrotermais superimpostas por fluidos juvenis. As amostras analisadas contêm ambas as luminescências azul e vermelha, sendo que a primeira é uma resposta comum dos feldspatos criptoperíticos e a segunda, dos micropertíticos. As concentrações de  $Ti^{+4}$ ,  $Ga^{3+}$  e  $Eu^{2+}$  não variam muito entre os feldspatos alcalinos com ambas as luminescências, portanto, não parecem ser responsáveis pela padrões CL observados. Os autores concluem que a interação fluido-rocha ou remove a luminescência azul dos feldspatos (deixando-os com pouca ou nenhuma luminescência) ou muda a mesma para a cor vermelha. Neste panorama, a CL azul foi interpretada como provavelmente advinda da presença de defeitos paramagnéticos pontuais no oxigênio e a vermelha como proveniente da alteração hidrotermal dos cristais, possivelmente relacionada ao aumento de  $Fe^{3+}$ .

Recentemente, Slaby et al. (em publicação) realizaram um estudo de CL com megacristais de feldspato alcalino do plutônio Santa Angelica (estado do Espírito Santo) para documentar as variações texturais e micro-estruturais. Como resultado, observaram que os

feldspatos alterados mostram uma certa luminescência azul, porém não tão intensa quanto à exibida pelos feldspatos alcalinos menos alterados. Já a luminescência vermelha foi encontrada de maneira muito sutil em algumas porções dos cristais. Os autores relacionaram a presença dessa cor a um relativo aumento de  $\text{Fe}^{3+}$ .

No caso de nefelinas, existe escassa literatura que aborde as propriedades CLA. Um estudo realizado por Finch (1991) nos mesmos nefelinas sienitos da Província de Gardar (Groenlândia) citados acima, relatou que a nefelina não apresenta luminescência de destaque, exibindo cor cinza. Entretanto, em outras ocorrências, tem sido observada fraca e mesmo inconstante luminescência azul (Finch, 1991; Karakus e Moore, 2002). Já no caso de sodalita, normalmente observa-se luminescência bem marcada e com cores variáveis, possivelmente associadas a variações composticionais e estruturais, como laranja (Finch, 1991), rosa vibrante (Dumanska-Slowik et al, 2015), azul (Dumanska-Slowik et al, 2015; Hassib et al, 2001), vermelha (Mariano, 1978; Marshall, 1988) ou ainda amarela (Schipper et al, 1972).

Nos minerais do grupo das zeólitas, a CL tem sido relatada nas mais diversas cores, variando conforme a composição, estrutura e estado da amostra. Por outro lado, é notável que zeólitas desidratadas não apresentam luminescência, embora algumas variedades enriquecidas em Mn tenham sido notificadas emitindo CL (Joshi e Bhoskar, 1983). Claffy e Schulman (1950) induziram artificialmente a luminescência em zeólitas inserindo elementos ativadores e observaram que diversas zeólitas dopadas com Cu mostram CL verde em tons variáveis (por exemplo, natrolita emite luz verde clara somente quando tratada com quantidades de Cu mais elevadas), já as mesmas, dopadas com Ag, apresentam luminescência azul. Variações de cores foram observadas também em dependência da presença de Mn e Pb, individualmente ou juntos. Os autores concluem que, no caso destes minerais, o efeito de luminescência está diretamente relacionado à presença de ativadores.

## 7. RESULTADOS OBTIDOS

### 7.1 Descrições macroscópicas gerais e classificação modal

Macroscopicamente, os chibinitos são rochas maciças de orientação incipiente, com textura inequigranular seriada de granulação grossa, contendo feldspato alcalino, nefelina, piroxênio e eudialita (encontrada em agregados, geralmente onde não há abundância de piroxênio). Os lujauritos, por sua vez, são fortemente foliados, com textura inequigranular fina a média, feldspatos alcalinos e nefelinas contornados por agulhas de piroxênio e eudialita. Já os nefelina sienitos, são leucocráticos, foliados, mostram textura equigranular (podendo ser fina ou média, dependendo da amostra) e mineralogicamente contem feldspato alcalino, nefelina e piroxênio (em proporções menores do que as demais rochas).

A Figura 9 apresenta a classificação das rochas do corpo Iujaurítico chibinítico no diagrama FA-P-F de classificação petrográfica das rochas insaturadas da IUGS, baseado nos dados modais obtidos por Gualda (1998). Todas as rochas correspondem a nefelina sienitos.

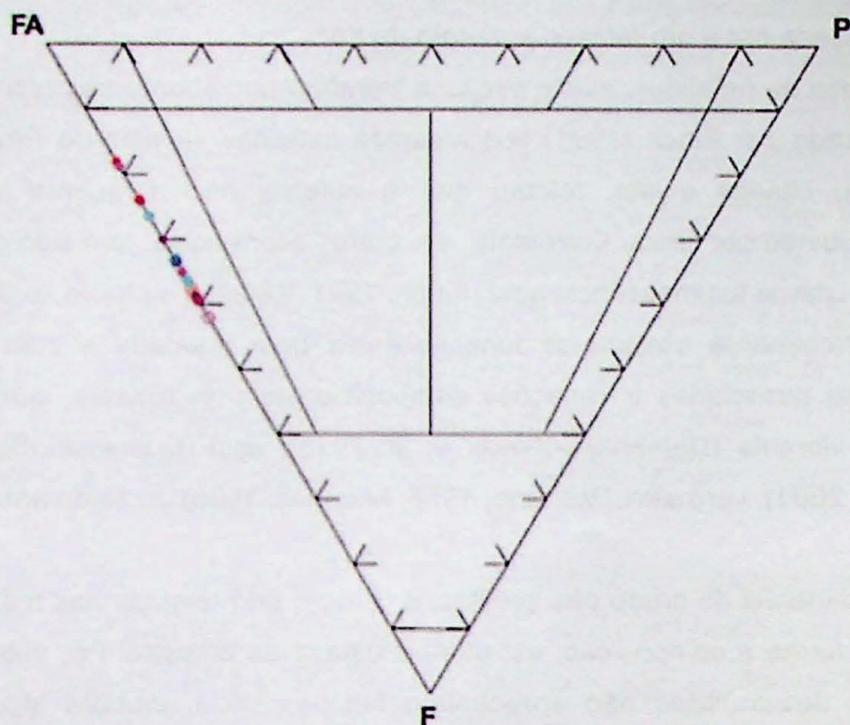


Figura 9: Diagrama FA-P-F (Le Maitre, 2002) para classificação de rochas insaturadas, onde FA: feldspato alcalino; P: plagioclásio; F: feldspatóides. Vermelho: chibinitos. Azul escuro: NeSi I. Azul claro: NeSi II. Rosa: Lu I. Roxo: Lu II. Quadrados cheios: dados de Ulbrich, (2002). Bolas: dados de (Gualda, 1998). Quadrados vazios: estimativa visual neste trabalho.

## 7.2 Descrições ao microscópio petrográfico

Neste trabalho foram examinadas e descritas 8 seções delgado-polidas que correspondem nas numerações originais de Ulbrich (1984) ou Gualda (1998) a PB-01B, PC-01B' e PC-15D (chibinitos), P-223b (1 e 2), PB-011 e PB-012 (Iujauritos) e PC-03C (nefelina sienito traquitóide). Uma síntese das descrições é apresentada a seguir. Todas as rochas analisadas se caracterizam pela típica sequência agpáitica de cristalização, em que os minerais félsicos (feldspato alcalino e nefelina) iniciam a cristalização antes dos minerais máficos (piroxênios sódicos e acessórios), os quais em geral aparecem intersticialmente.

### 7.2.1 Chibinitos

Os chibinitos apresentam textura hipidiomórfica inequigranular, com cristais maiores de feldspato alcalino tipicamente tabulares (ver Figura 10).

A mineralogia primária é constituída por feldspato alcalino, nefelina, eudialita, piroxênio sódico, e, subordinadamente, minerais acessórios, alguns raros. Zeólitas são observadas como minerais de alteração. O arcabouço da rocha é sustentado por grandes cristais de piroxênios poiquiliticos intersticiais à feldspatos alcalinos tabulares, com orientação incipiente

dos cristais maiores, entre os quais encaixam-se de maneira desordenada os demais minerais.

O feldspato alcalino representa aproximadamente metade da seção delgada em proporção, exibindo tamanhos entre 1,0 e 5,0mm. De maneira geral, é apresentado como um cristal idiomórfico, tabular, frequentemente geminado segundo a Lei de Carlsbad, com inclusões de nefelina e piroxênio. Manchas acastanhadas são comuns pelos cristais, distribuídas de maneira desordenada e heterogênea. Essas manchas parecem estar associadas à presença da geminação múltipla, em grade ou tartan, do microclínio (Figura 11), aqui observada mais frequentemente como *geminação pobre*, mas por vezes *incipiente* e mais raramente *boa* (de acordo com a classificação descrita por Ulbrich, 1983 e Ulbrich e Ulbrich, 2000). Suas bordas tendem a ser irregulares devido a interação com o piroxênio de segunda geração, que de certa forma parece *corroer* as bordas do feldspato. Quando incluso nos piroxênios poiquilíticos primários, contudo, mostra-se como cristais idiomórficos, porém com irregularidades nas arestas.

A nefelina, segundo mineral mais abundante na rocha (em torno de 30% da mesma), tende a se mostrar prismática, subidiomórfica a xenomórfica, bordas mais retilíneas e uniformes que as dos feldspatos. Tende a se encontrar alinhada com os cristais de feldspato alcalino (Figura 12). Frequentemente, as nefelinhas mostram-se quebradas entre vários cristais menores. Zeólita é uma alteração muito comum nesta, especialmente nas bordas, que tendem a estar bem corroídas. Apresentam tamanhos consideravelmente menores que os dos feldspatos, entre 0,5 e 1,5mm. Quando em contato direto entre eles, nefelina e feldspatos mostram vértices arredondados, arestas irregulares, por vezes interlobáticas (Figura 13). Além disso, é notável que a nefelina pode ocorrer parcialmente inclusa ao feldspato, mas o contrário não é observado.

Os piroxênios, conforme já mencionado, são encontrados em duas gerações, distinguíveis entre si não apenas pelo tamanho dos cristais, mas também (e principalmente) pelas relações texturais para com os demais cristais encontrados na amostra. Enquanto os piroxênios da primeira geração parecem ter uma relação de concomitância temporal com os demais minerais, evidente (por exemplo) pela textura poiquilitica (envolvendo feldspato alcalino e nefelina, principalmente, e menos frequentemente a eudialita), a segunda geração claramente representa um crescimento tardio em relação aos demais, apresentando aglomerados em uma textura de *folhas* (Gualda, 1998), que tende a envolver os cristais mais velhos, como se adaptassem ao entorno dos minerais que ali já existiam. Além disso, esses piroxênios de segunda geração também tendem a *corroer* a borda dos feldspatos alcalinos, textura que claramente sugere que os feldspatos teriam cristalizado previamente. Pela composição, ambos são egirinas.

Os piroxênios de primeira geração, de textura poiquilitica, apresentam tamanhos entre 1,0mm e 2,0 cm e representam a maior parte dos inossilicatos na amostra (cerca de 10% da

mesma). Tendem a incluir feldspatos alcalinos e nefelinas, geralmente idiomórficos (Figura 14). Frequentemente exibem um zoneamento concêntrico (Figura 15), no qual as bordas do mineral tendem a ter cores que vão de bege e a um verde claro e o centro exibe tons de verde garrafa. Os cristais são idiomórficos a subidiomórficos.

Os piroxênios de segunda geração apresentam dimensões menos expressivas (0,05 a 0,6mm) que os anteriores e, dessa forma, representam uma menor porcentagem do total da rocha (em torno de 5%). Não mostram zoneamento visível; o pleocroísmo vai de bege a verde escuro. Podem se encaixar entre os minerais mais antigos ou mesmo interceptando estes. Como boa parte da rocha é definida pelos cristais tabulares de feldspato alcalino, os piroxênios de segunda geração tendem, ao se encaixar em suas arestas, a seguir esta orientação. Cristais muito pequenos de egirina pura (incolor) em forma de agulhas são encontrados nos feldspatos alcalinos e nefelinas, encaixados em fraturas intragranulares, entre os planos de geminação, entre regiões de zoneamento ou aleatoriamente espalhados no interior dos cristais (neste último caso, verifica-se um maior acúmulo relativo nas regiões mais manchadas dos feldspatos alcalinos do que nas mais limpidas).

A eudialita representa aproximadamente 3% da rocha, com cristais que mostram tamanhos que variam de 0,1 a 0,5mm, subidiomórfica a xenomórfica. Morfologicamente, suas arestas tendem a se encaixar entre os cristais vizinhos.

Como acessório, foi encontrada pectolita, medindo entre 0,7 e 1,2 mm, idiomórfica, ripiforme, muito bem desenvolvida, com arestas retilíneas, além de rinquita e lamprofilita. Sodalita também foi observada, em baixas proporções, geralmente ocorrendo conjuntamente com a nefelina.

Quanto a sequência de cristalização das amostras, supõe-se a mesma tenha se iniciado com cristalização de feldspatos alcalinos (os cristais mais desenvolvidos na lâmina), que seguiu concomitante com as nefelinas e com as egirinas primárias, desenvolvendo a textura chibinítica característica da rocha, ao englobar os demais cristais. Eudialita provavelmente cristalizou-se um pouco mais tarde, uma vez que as feições observadas indicam que ela se acomodou à cristais previamente existentes. É difícil determinar em que momento a pectolita foi inserida no sistema, dada a raridade do mineral nas amostras estudadas, mas fica claro que se trata de um mineral primário. Como fase tardia, apresenta-se a egirina de segunda geração, sobrepondo-se aos demais e encaixando-se em zonas de fraqueza, como nos contatos entre os minerais.

Em comparação com a análise de Gualda (1998), essa descrição é focada mais nas análises texturais do que na mineralogia. De modo geral, as descrições são muito parecidas, inclusive nas proporções (ver Figura 9). Ressalta-se, porém, a observação de sodalita, não descrita pelo estudo prévio.

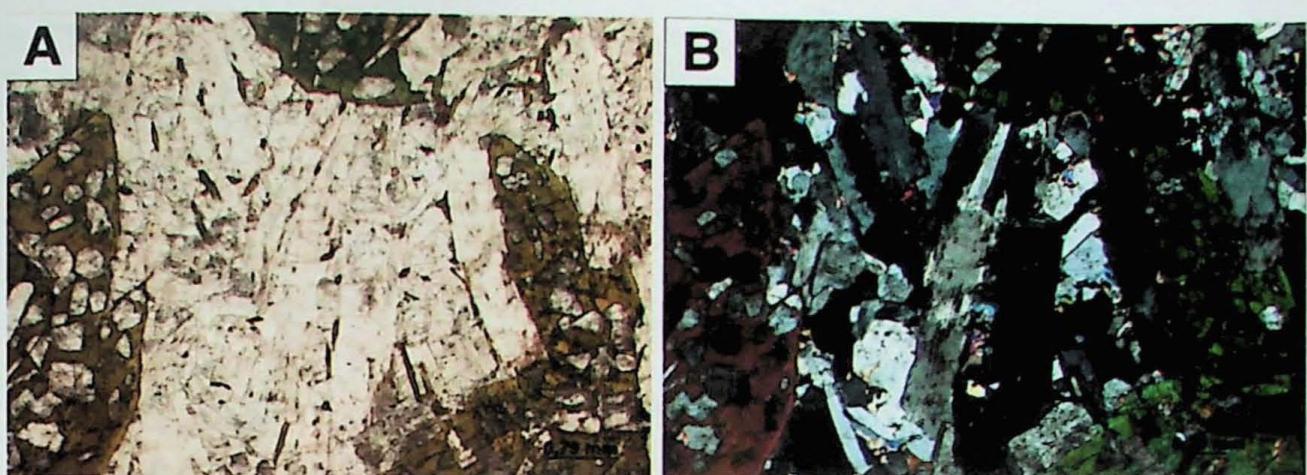


Figura 10: Visão geral da textura poliquilítica na rocha, com inclusões de feldspatos e nefelinas na egirina. Observa-se também a presença de grandes cristais de feldspato alcalino tabulares, levemente orientados. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

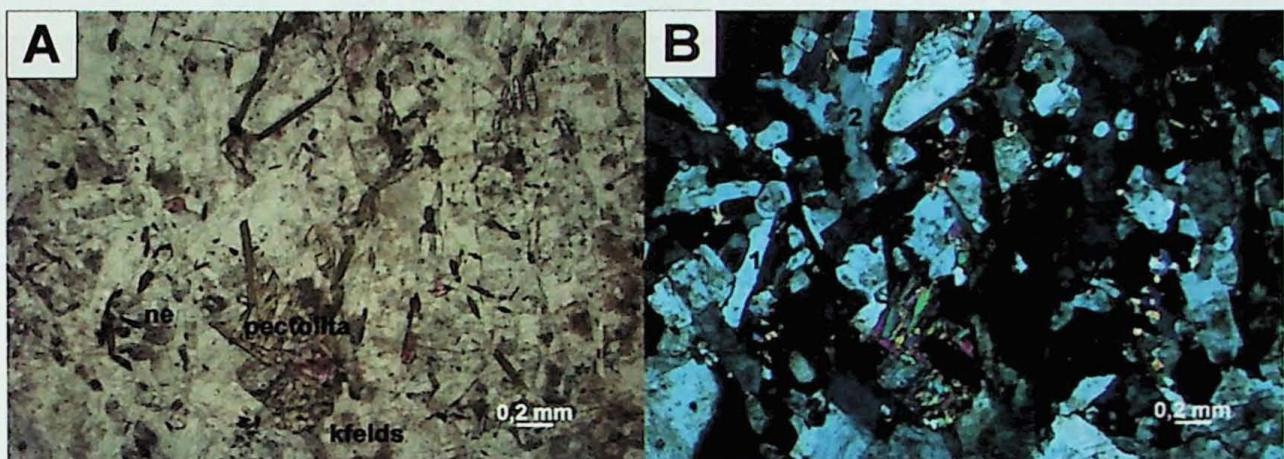


Figura 11: Chibinitos com feldspatos alcalinos exibindo geminação múltipla no microclínio. Na imagem A, identifica-se os minerais observados (pectolita, feldspato alcalino e nefelina). Na imagem B: 1) ausência de geminação; 2) geminação incipiente; 3) geminação pobre; 4) geminação boa (Ulbrich, 1983). Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

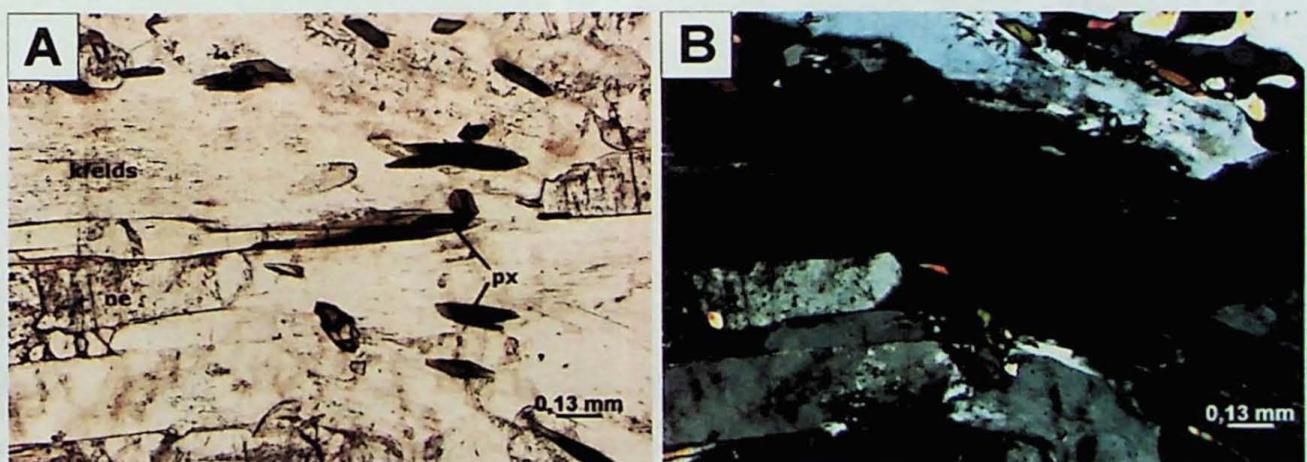


Figura 12: Alinhamento das nefelinas de acordo com a orientação dos feldspatos tabulares, além de cristais de piroxênio ripiformes cristalizados segundo a orientação dos cristais maiores. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

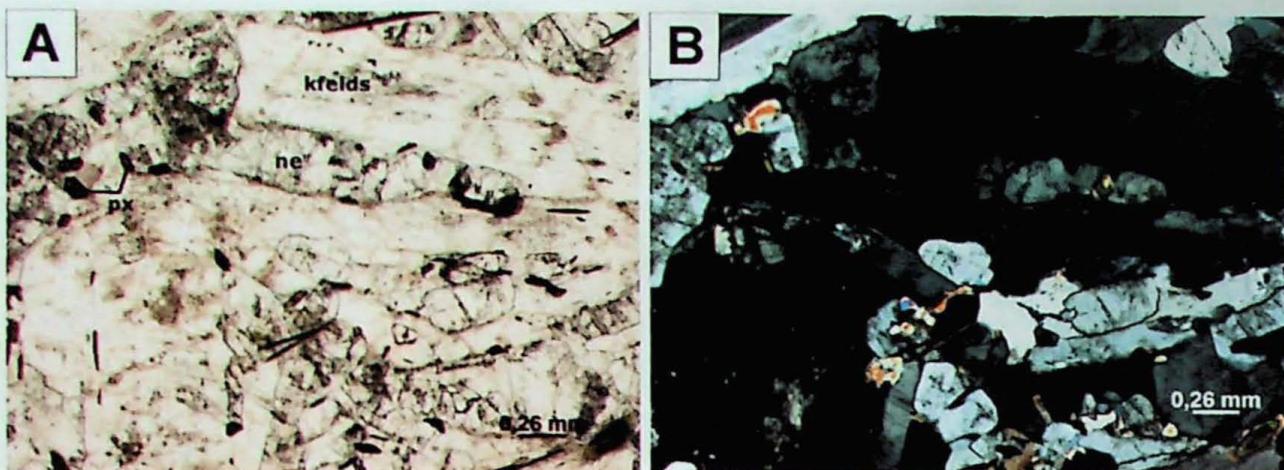


Figura 13: Feldspato alcalino e nefelina em contato irregular entre os grãos, com arestas e vértices curvilíneos. Observa-se a nefelina adentrando os cristais de feldspato alcalino. Nota-se também pequenos cristais prismáticos de egirina. Figura A com luz plana polarizada e B com polarizadores cruzados.

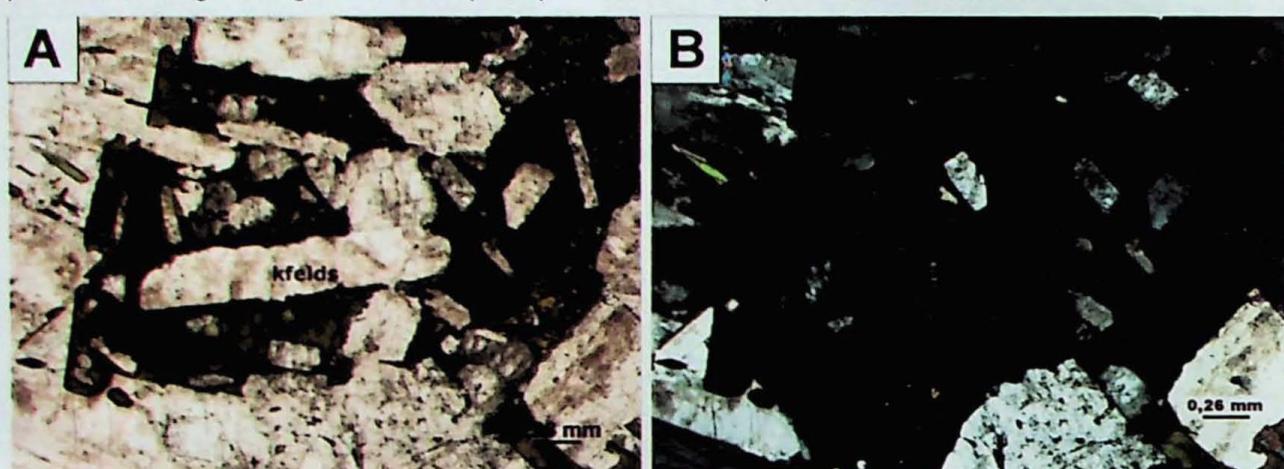


Figura 14: Feldspato alcalino e nefelinas idiomórficos inclusos em egirina poiquilitica. Nota-se o formato irregular dos contatos, de aspecto ligeiramente corroído. Figura A com luz plana polarizada e B com polarizadores cruzados.

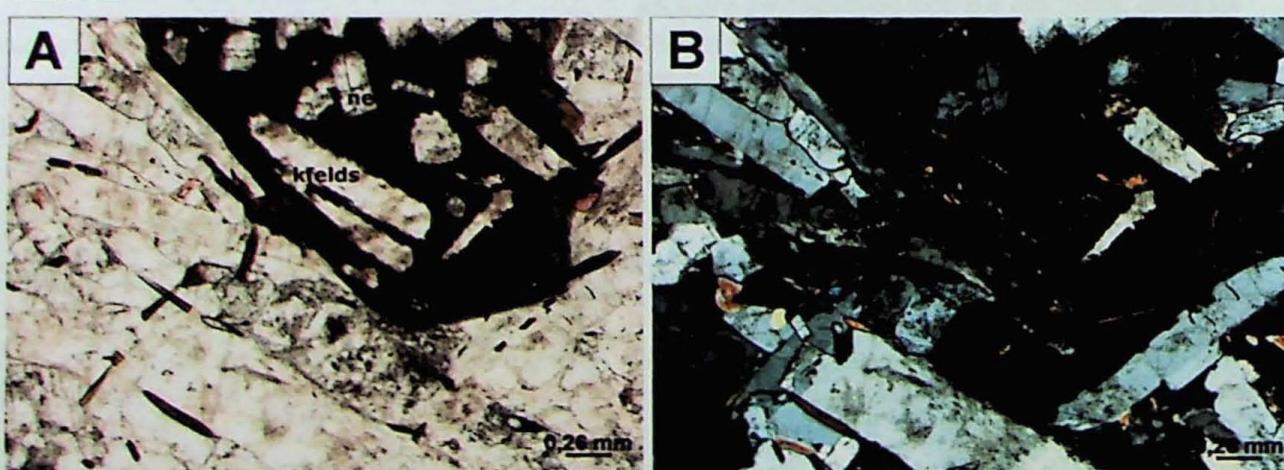


Figura 15: Piroxênio poiquilitico com zoneamento concêntrico e inclusões tabulares de feldspato alcalino e nefelina. Os feldspatos alcalinos mostram-se manchados, com geminação múltipla incipiente predominante. Nota-se também cristais ripiformes de piroxênio, cristalizados nos contatos entre os demais minerais. Figura A com luz plana polarizada e B com polarizadores cruzados.

### 7.2.2 Lujauritos

Texturalmente, são rochas com forte orientação planar e texturas inequigranulares de granulação grossa. O arcabouço e a orientação da rocha são definidos principalmente pelos feldspatos alcalinos (que podem atingir 8mm), em volta dos quais se desenvolvem pequenos cristais de piroxênio e entre os quais tendem a se encaixar os demais minerais. A Figura 16 mostra uma visão geral dessa rocha.

A mineralogia essencial é constituída por feldspato alcalino, nefelina, eudialita e apenas uma geração de piroxênio, considerada tardia em relação ao resto da rocha. De maneira geral, observa-se que os cristais não estão distribuídos homogeneamente na rocha, ressaltando-se a existência de regiões de acúmulo de nefelinas (Figura 17).

O mineral mais comum observado é o feldspato alcalino. São cristais alongados, tabulares, orientados, idiomórficos a subiomórficos, frequentemente exibindo geminação carlsbad e manchas acastanhadas distribuídas de forma heterogênea. Geminações múltiplas também foram identificadas (Figura 18), embora não ocorram em todos os cristais, podendo ser incipiente, pobre ou boa (Ulbrich, 1983) e correspondem às zonas acastanhadas observadas em luz plano polarizada. Um fraco zoneamento concêntrico é encontrado de forma eventual nas amostras. As arestas são irregulares devido a cristalização de pequenos cristais piroxênicos nas mesmas, que atribuem às bordas um aspecto corroído (Figura 19). Quando não há presença de piroxênicos nos limites do cristal, os contatos tendem a ser retilíneos. Os feldspatos alcalinos representam em torno de 40% da rocha.

A nefelina (20 a 25% da rocha) tem tamanhos entre 0.25 e 0.8mm. Os cristais são subidiomórficos a xenomórficos, com contatos muito irregulares. No geral apresenta bastante alteração, em especial nos limites dos cristais (Figura 20). Fraturas intragranulares são frequentemente observadas. Mostram-se bastante alteradas, especialmente nas bordas, que não são muito bem definidas.

Eudialita foi encontrada em diferentes proporções nas amostras. Nas seções delgadas Pb-223b 1 e 2, ela existe, mas não é muito frequente. Entretanto, é bastante recorrente na lâmina PB-011, onde representa cerca de 20% da mesma. Os cristais são subidiomórficos, com arestas bem definidas e tendem a se encaixar entre os feldspatos alcalinos (ver Figura 21), contendo diversas inclusões de piroxênicos. Fraturas intragranulares são recorrentes.

O piroxênio (egirina) representa entre 20 e 30% da rocha (dependendo da seção analisada) e é tardio em relação aos demais cristais, provavelmente sendo o correspondente da segunda geração de piroxênicos observada nos chibinitos, uma vez que são morfologicamente semelhantes e possuem a mesma relação temporal em relação ao resto da rocha. Alguns são aciculares, outros são prismáticos, mas todos são idiomórficos, com bordas retas. Se apresentam aglomerados em planos que se encaixam entre os minerais (Figura 22) e, por vezes, interceptam-os (Figura 23), sugerindo mais uma vez que são cristais posteriores em relação ao restante da rocha. Tendem a se acumular em zonas de fraqueza na rocha,

sendo encontrados inclusive entre geminações do feldspato. Alguns sugerem ter crescido inclusive em um zoneamento incipiente dos feldspatos alcalinos (Figura 24). Por se encaixarem principalmente nos contatos entre os cristais e entre os planos de geminação, existe uma tendência de orientação dos piroxênios de maneira concordante com os feldspatos alcalinos. Estes cristais não ultrapassam 1mm de diâmetro, porém, além dos mesmos também são observados com frequência piroxênios completamente incolores, interpretados como egirinas puras, que tendem a ocorrer em agulhas muito finas concordantes com a elongação dos minerais hospedeiros (Figura 25).

Como acessório, sodalita e lamprofilita foram observadas.

A cristalização da rocha provavelmente deu-se na seguinte ordem: primeiramente foram formados os feldspatos alcalinos (que são megacristais, bem desenvolvidos), seguidos pelas nefelinas, eudialitas (que se encaixam os espaços remanescentes da rocha) e, posteriormente, as egirinas, abrindo espaço no contato entre os grãos e corroendo a borda dos minerais mais antigos, como o feldspato alcalino.

### 7.2.3 Nefelina sienito

A textura é hipidiomórfica, inequigranular porfirítica, na qual os porfiroclastos são majoritariamente feldspatos alcalinos e a matriz, nefelina.

A mineralogia essencial é constituída de nefelina, feldspato alcalino, piroxênio, albíta e sodalita. Como alteração, zeólita foi observada. A Figura 26 mostra uma visão geral da amostra.

A variedade mineralógica mais recorrente na rocha é a nefelina, corresponde a aproximadamente 45% da seção delgada analisada, mas ocorre na forma de pequenos cristais de 0,2 a 1 mm. Apresenta-se subidiomórfica a idiomórfica, em cristais elongados com fraturas intragranulares. Frequentemente mostra-se quebrada em diversos cristais menores, contudo de mesma orientação ótica (Figura 27), além de recorrentes fraturas intragranulares. Os vértices dos cristais tendem a ser arredondados e as arestas, quando não destruídas, retilíneas com menores irregularidades. Aparenta extinção ondulante que sugere uma certa deformação.

O feldspato alcalino é o segundo mineral mais comum observado, representando cerca de 40%. Se mostra idiomórfico a subidiomórfico, em cristais tabulares, intensamente alterado, com geminação carlsbad frequente. Geminação múltipla raramente é vista (Figura 28) e, como nas demais rochas, corresponde à zonas manchadas nos cristais. Extinção ondulante também foi observada, sugerindo, assim como na nefelina, deformação. Quando em contato direto, feldspatos alcalinos e nefelinas mostram uma interface abrupta e com menores irregularidades (Figura 29). Os cristais podem chegar a 7mm no maior eixo e estão sutilmente orientados.

O piroxênio (egirina) é mostrado mais recorrentemente na forma de prismas muito bem formados, idiomórficos a subidiomórficos, com textura poiquilítica (onde as inclusões mais frequentes são feldspato alcalino e nefelina). Nos contatos com as inclusões, os piroxênios exibem bordas muito irregulares, com feições na forma de *dentes*. O pleocroísmo do mineral varia de bege a verde escuro. Por vezes pode apresentar um leve zoneamento. O diâmetro varia de 0,1 a 4,0 e o mineral corresponde a cerca de 5% da amostra. Estes cristais são muito provavelmente primários, correspondentes à primeira geração de egirinas observadas nos chibinitos, embora seja notável que estes não sejam tão bem desenvolvidos quanto. Contudo, também foram observadas finas agulhas de egirinas incolores, ainda que não tão comuns, ocupando espaços nos contatos entre os grãos (Figura 30), sendo mais provavelmente pertencentes à uma segunda geração de piroxênios.

A albita é encontrada subidiomórfico a xenomórfico, geminada. Não apresenta elongação muito proeminente, tendo os eixos de tamanhos similares. Representa menos de 1% da composição total da seção delgada estudada, com tamanhos que variam de 0,5 a 0,9 mm.

Sodalita foi observada, correspondendo a aproximadamente 3% da rocha, xenomórfica, com bordas irregulares e diâmetro entre 0,5 a 3,0mm. Sua ocupação se dá, principalmente, no preenchimento dos interstícios da rocha.

Além destes, foram identificados também cristais de feldspato recristalizado, não sendo possível estabelecer se correspondem a feldspatos alcalinos ou plagioclásios apenas com a microscopia ótica.

Outros acessórios presentes são: rinquita, fluorita e gianetita.

A cristalização da rocha provavelmente foi iniciada com a formação dos feldspatos alcalinos, que se estendeu por um longo tempo, parcialmente concomitante com a formação subsequente de nefelinhas e piroxênios poiquilíticos, que englobaram os dois primeiros. A sodalita, preenchendo interstícios, provavelmente cristalizou-se depois destes. As finas agulhas de egirina observadas no interior dos cristais, bem como as albitas, foram cristalizadas tarde em relação aos demais.

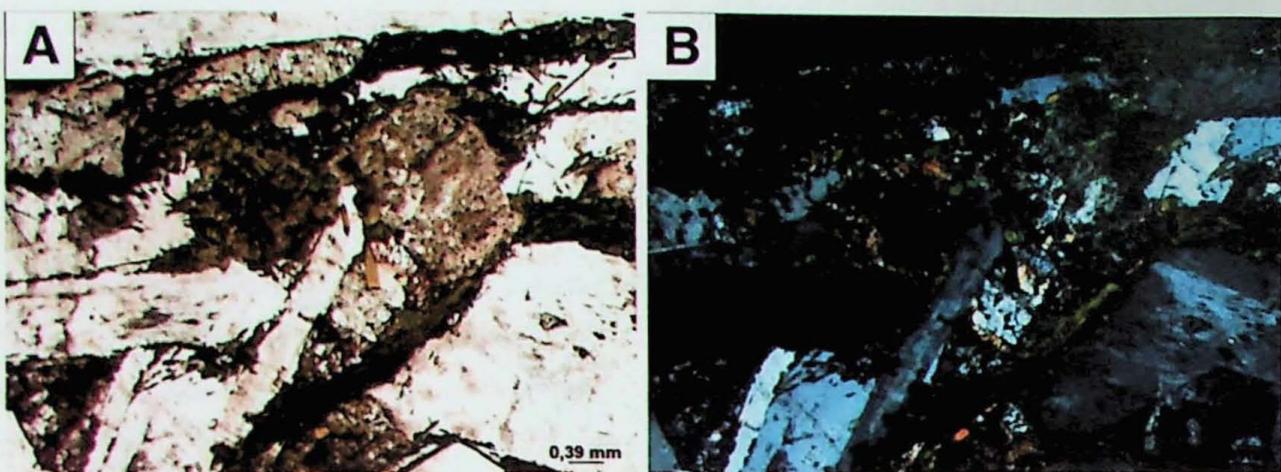


Figura 16: Visão geral da textura iujaurítica, com folhas de piroxênios cristalizadas nos contatos entre os minerais.

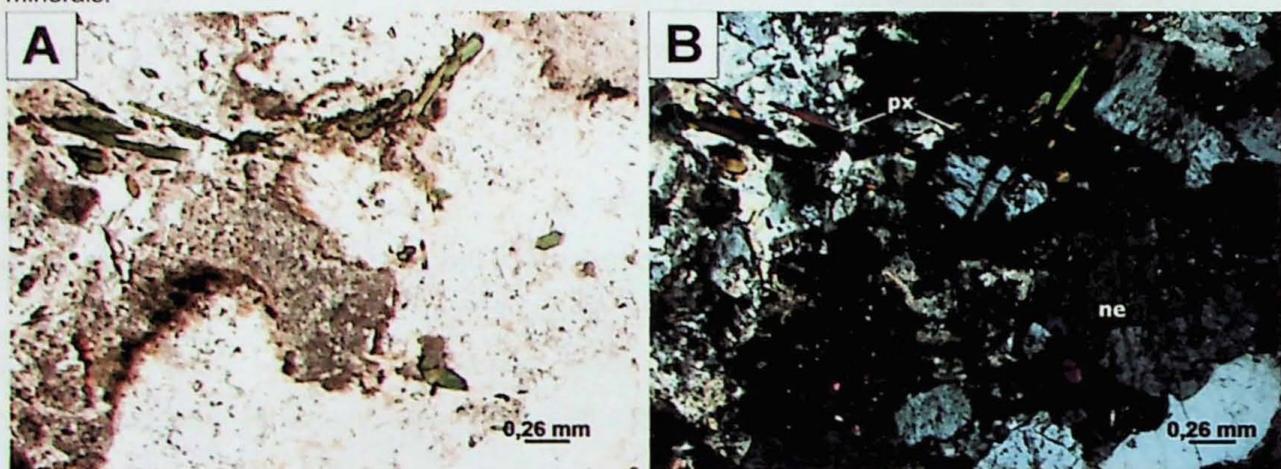


Figura 17: Acúmulo local de cristais de nefelina muito alterados e de bordas difusas, com pouco crescimento das egirinas de segunda geração. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

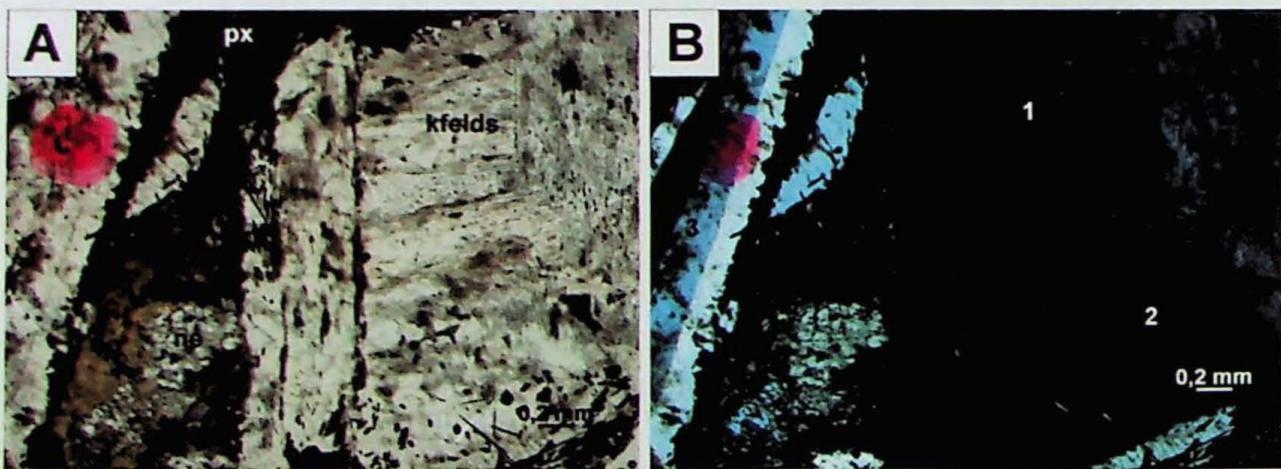


Figura 18: Cristais de microclínio com geminação múltipla. Na figura B: 1) geminação boa; 2) geminação pobre; 3) geminação múltipla ausente (presente a geminação carlsbad), de acordo com Ulbrich (1983). Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

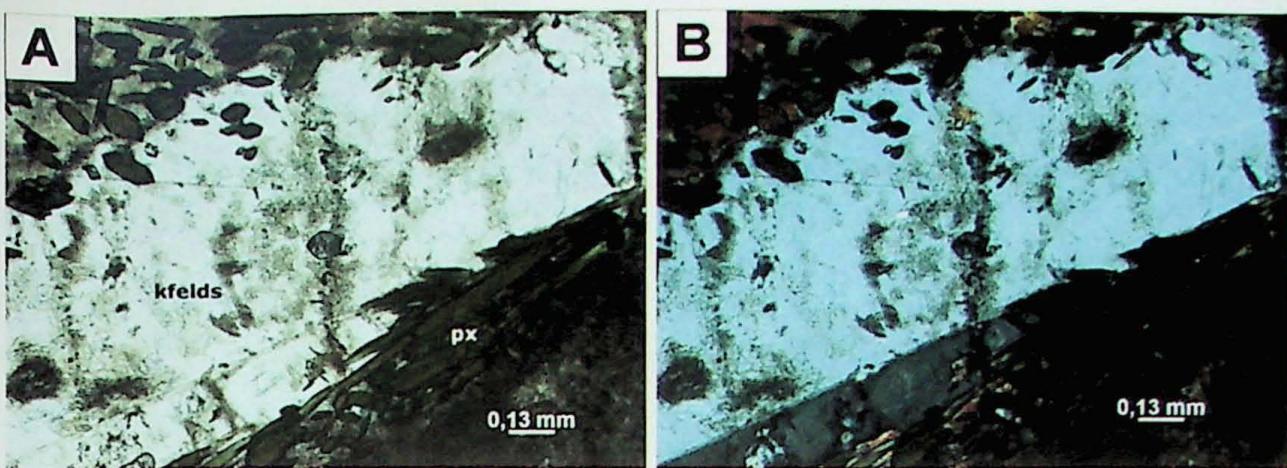


Figura 19: Feldspato alcalino com geminação carlsbad com borda de aspecto corroído devido ao crescimento da segunda geração de piroxênios. O feldspato mostra geminação múltipla incipiente. Figura A (à esquerda) com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados (à direita).

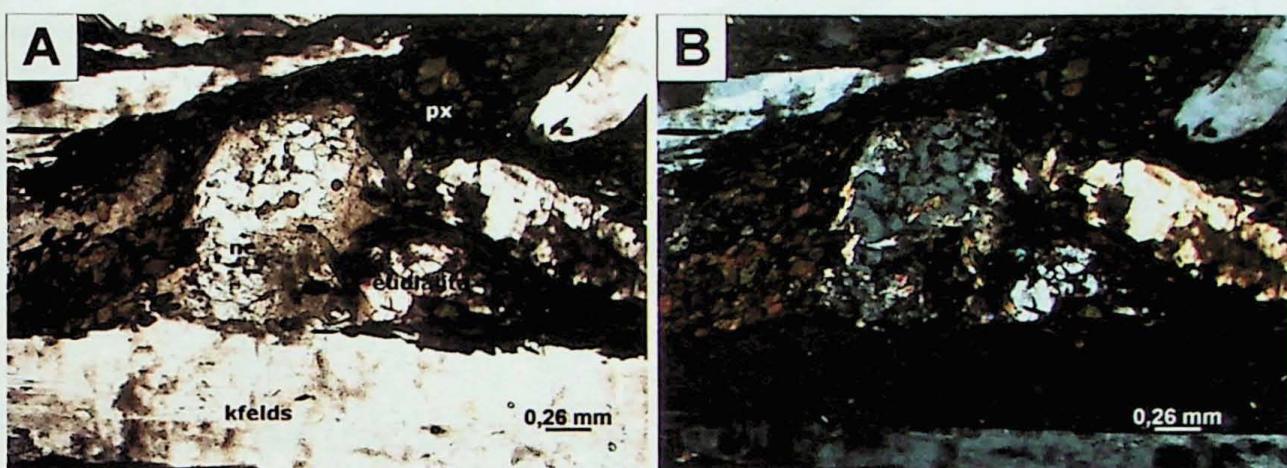


Figura 20: Alteração nas bordas de aspecto corroído nas nefelinas e cristais de egrina apontando para dentro do mineral. Nota-se a textura de acúmulo de piroxênios em folhas, contornando os demais minerais. Observa-se também cristais tabulares de feldspato alcalino e um cristal de eudialita com alteração rosa nas bordas.

Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

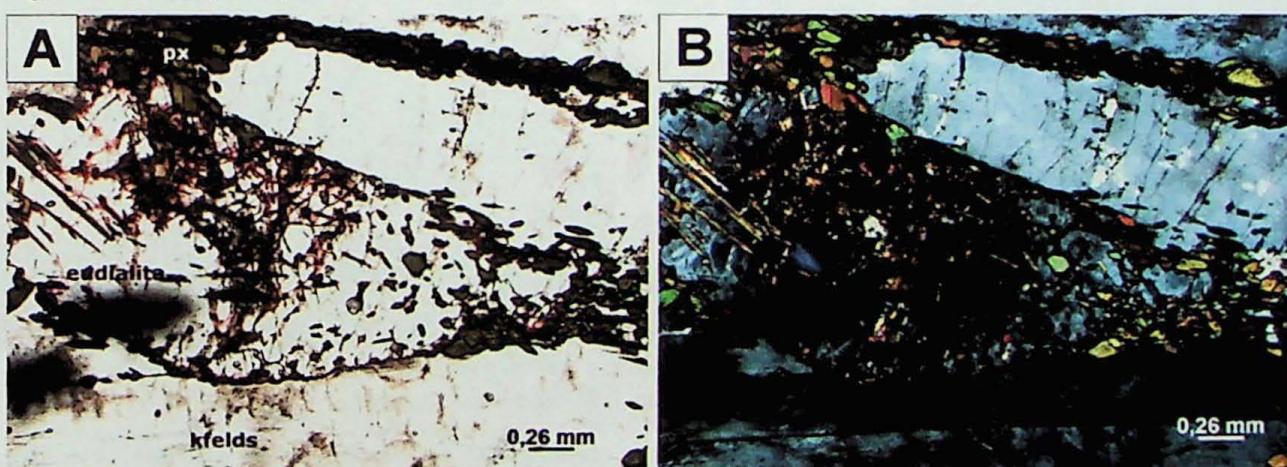


Figura 21: Eudialita preenchendo interstícios entre os feldspatos alcalinos tabulares, se amoldando ao espaço disponível e cristalização posterior de piroxênios nas arestas dos cristais e no interior da eudialita. Na parte interior da imagem também é visível um feldspato alcalino com geminação carlsbad e geminação múltipla (pobre – Ulbrich, 1983) concomitantes. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

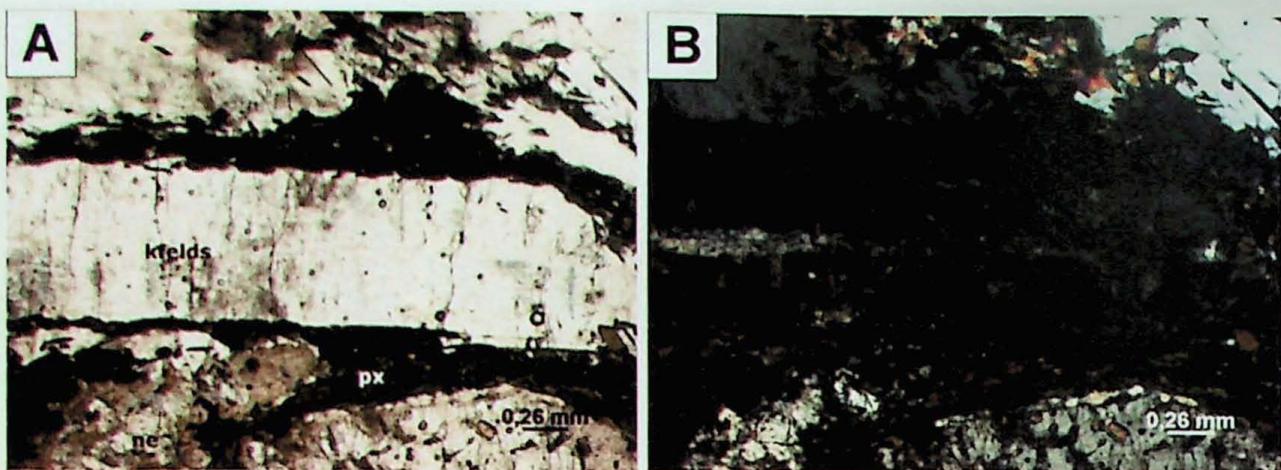


Figura 22: Folhas de piroxênios de segunda geração segundo os contatos entre os minerais (feldspato alcalino tabular e nefelina xenomórfica com bordas alteradas). Figura A com luz plana polarizada e B com polarizadores cruzados.

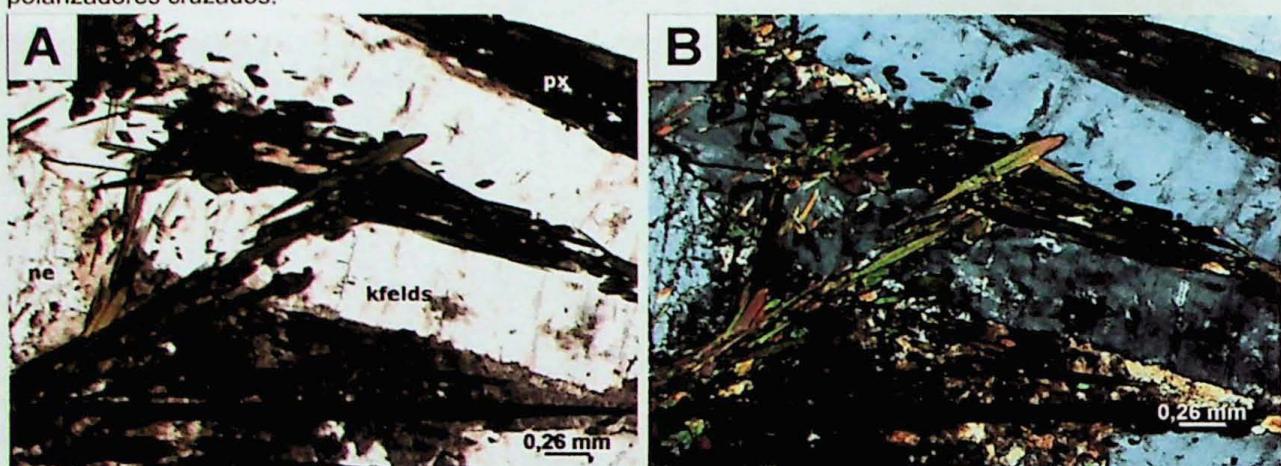


Figura 23: Egirinas adentrando nos cristais tabulares de feldspato alcalino. Figura A com luz plana polarizada e B com polarizadores cruzados.

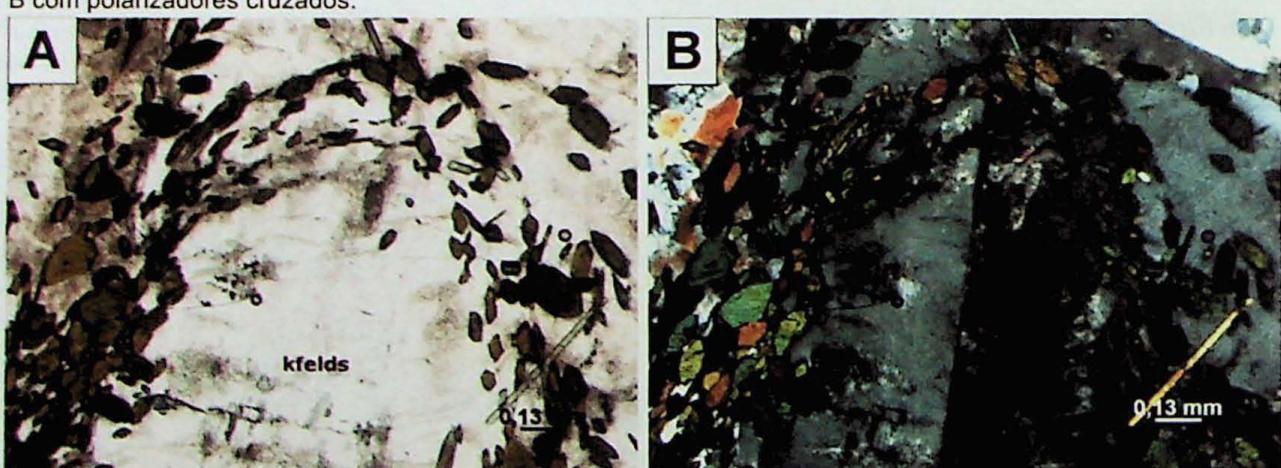


Figura 24: Prismas de egirinas no interior feldspato alcalino com geminação carlsbadorientados de forma concêntrica. Figura A com luz plana polarizada e B com polarizadores cruzados.

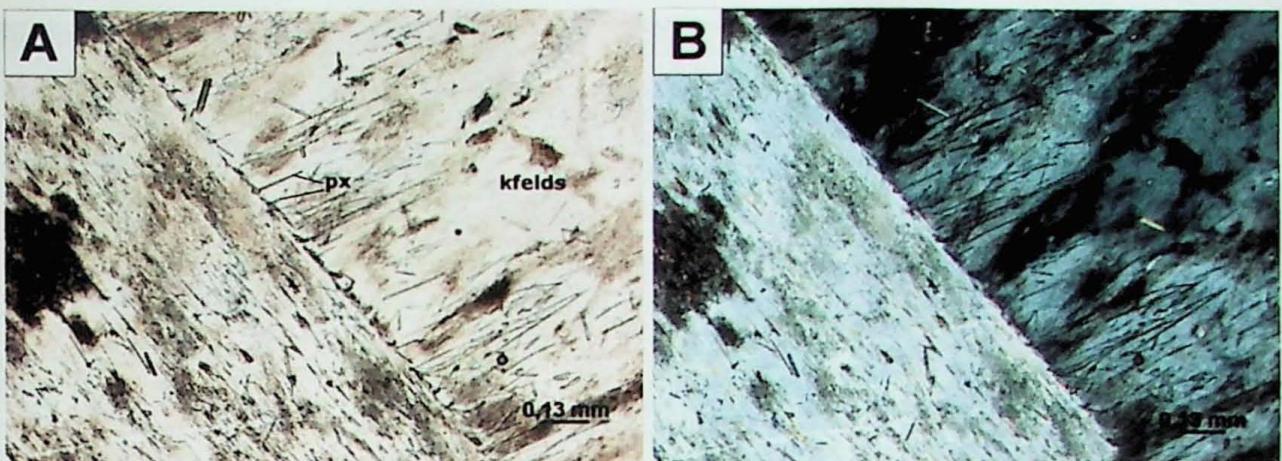


Figura 25:Finas agulhas de egirinas com orientação preferencial segundo a elongação dos feldspatos alcalinos. Na foto observa-se dois cristais diferentes e duas distintas direções de paralelismo dos piroxênios. Na interface entre os feldspatos também é óbvio o preenchimento com as agulhas, seguindo a direção da aresta. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

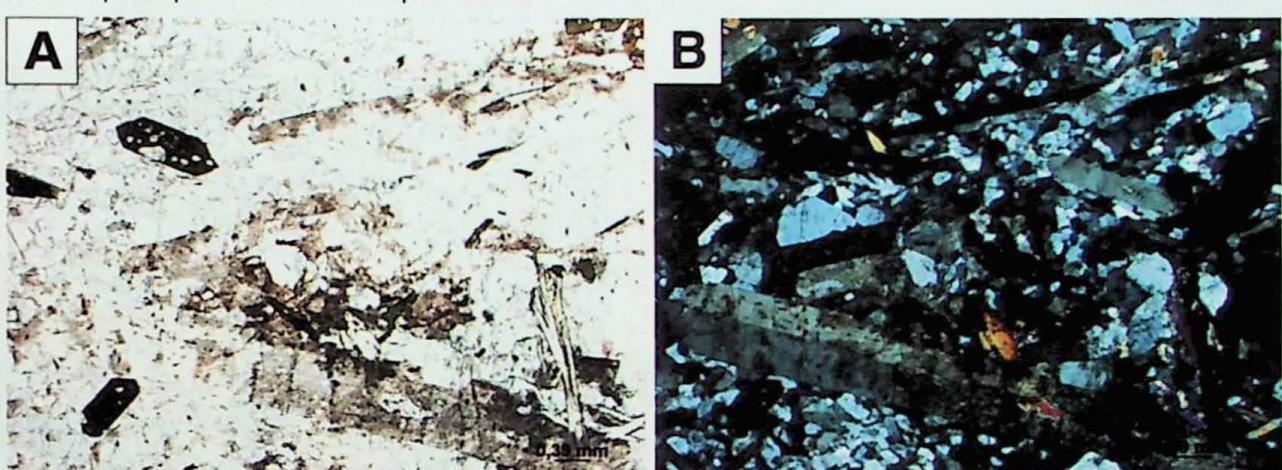


Figura 26: Visão geral da amostra, ressaltando os grandes cristais de feldspato alcalino tabulares levemente orientados.

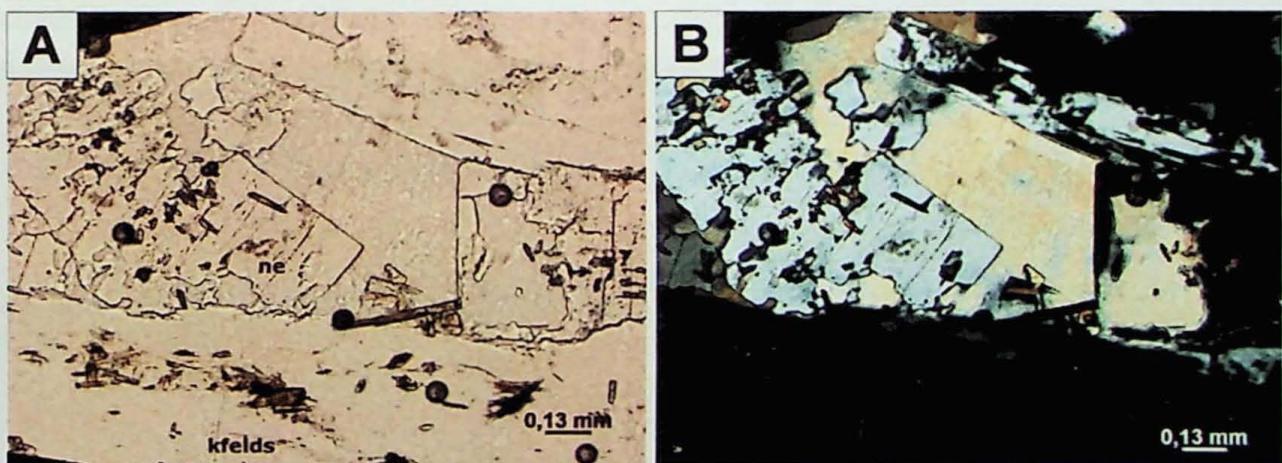


Figura 27: Nefelina de aparência corroída mantendo a orientação ótica com pequenas inclusões de egirina e cristais de feldspato alcalino. Figura A com luz plana polarizada e B com polarizadores cruzados.

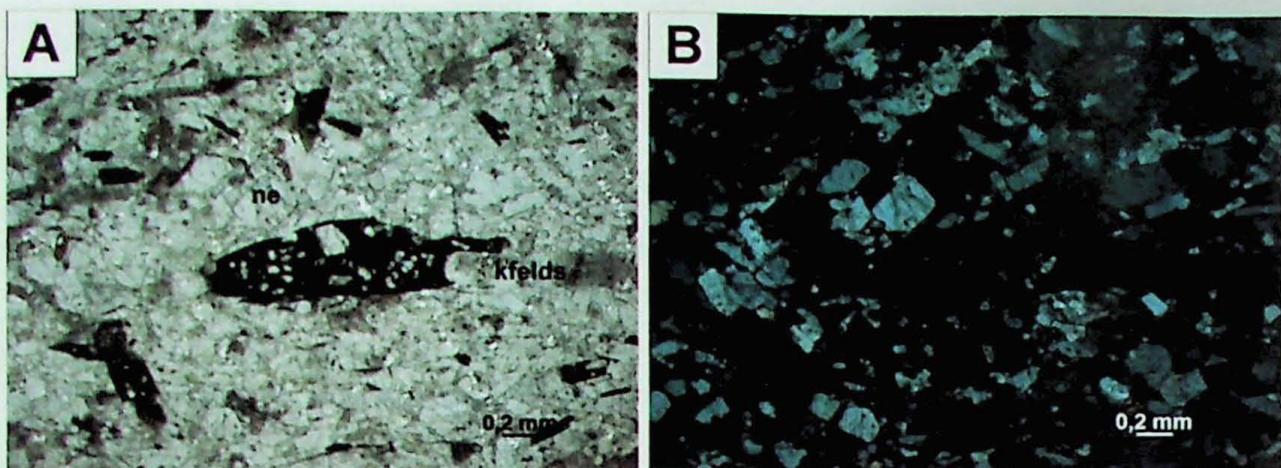


Figura 28: Feldspatos alcalinos sem geminação múltipla ou, quando presente, incipiente. Piroxênio poiquilítico contendo diversas inclusões de nefelina e feldspato alcalino. Nota-se também a relativa escassez de máfico nessa rocha (quando comparada aos lujauritos e chibinitos). Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

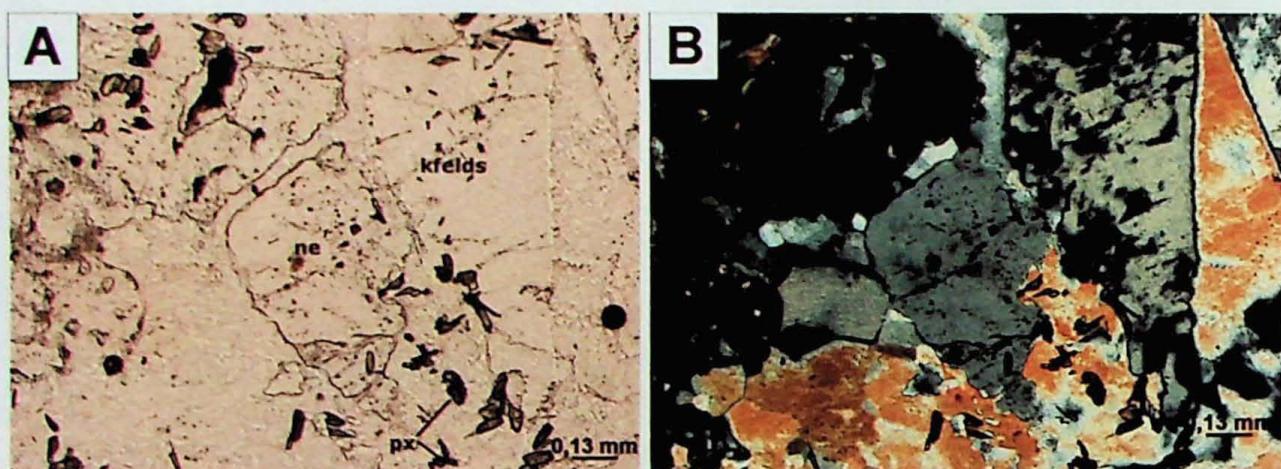


Figura 29: Contatos abruptos, porém irregulares entre nefelinas e feldspatos alcalinos. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

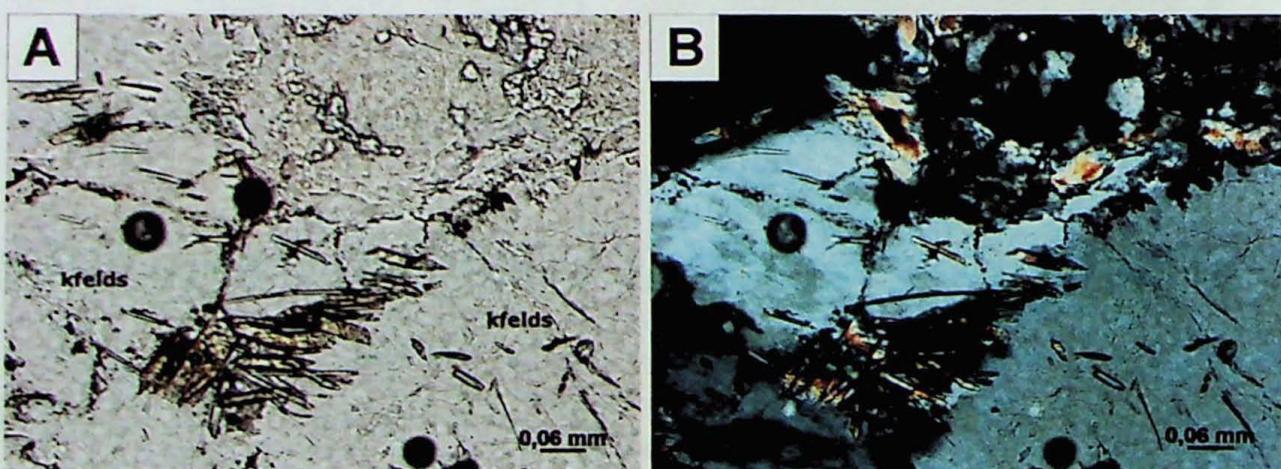


Figura 30: Finais agulhas de egirinas puras no contato entre dois cristais de feldspato alcalino, cujas bordas são irregulares. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

### 7.3 Imageamento eletrônico

Foram obtidas imagens BSE-Compo, de raios X (WDS e EDS) e de CL, enfatizando cristais de feldspato alcalino e nefelina, para quatro áreas selecionadas das seções delgado-polidas descritas de três amostras representativas dos chibinitos (1 área, amostra PC-01B) dos Iujauritos (2 áreas, amostra P-223b) e dos nefelina sienitos traquitóides (1 área, amostra PC-03C). As imagens de CL são apresentadas na forma de imagens originais, obtidas com filtros azul ou vermelho e na forma de composições coloridas, obtidas combinando-se as imagens anteriores com o software ImageJ. Os principais resultados são sumarizados a seguir.

#### 7.3.1 Chibinito

A área imageada representativa dos chibinitos apresenta uma seção transversal de um cristal bem desenvolvido de feldspato alcalino, com diversas pequenas inclusões de egirina e manchas acastanhadas (correspondentes às zonas de geminação múltipla descritas por Ulbrich, 1983), como pode ser observado na Figura 31. Apresenta também cristais de nefelina, sodalita e zeólitas, nas margens do feldspato. Na imagem por elétrons retroespelhados (Figura 32), é possível verificar essa mineralogia, ressaltando ainda as bordas de alteração de zeólita nas nefelinhas, visíveis nessa imagem com uma cor mais escura (número atômico médio menor). Nos mapas composticionais (Figura 32 e Figura 33) observa-se que os feldspatos alcalinos são fortemente potássicos, com sódio praticamente ausente. Entre as nefelinhas e o feldspato, existe uma fase intersticial muito pobre em potássio e sílicio. A sodalita mostra um alto teor de cloro. Nas zeólitas é possível observar a presença de estrôncio. Os piroxênios são relativamente enriquecidos em titânio. A imagem de Fe ressalta bem os piroxênios e a de Al diferencia todas as fases existentes.

No imageamento por catodoluminescência (composição colorida na Figura 35 e imagens originais Figura 36 e Figura 37) o feldspato alcalino apresenta luminescências azul e vermelha distribuídas de modo heterogêneo no cristal; a cor azul é predominante e está distribuída por todo o cristal enquanto a cor vermelha aparece concentrada em algumas áreas e, em especial, ocorre mais frequentemente nas bordas do cristal revelando algum tipo de zonamento. Merece ser ressaltado que existe alguma correspondência das zonas mais acastanhadas com as zonas vermelhas.

A nefelina por sua vez exibe apenas luminescência azul, que varia bastante em sua intensidade ao longo dos cristais, provocando um aspecto *manchado* na imagem de CL. É possível também notar uma cor rosa muito vibrante nos cristais de sodalita (gerada por uma forte luminescência vermelha, com alguma contribuição de luminescência azul). As zeólitas exibem luminescência azul, mas mais intensa e constante do que a observada nas nefelinhas. Os piroxênios não exibem luminescência.

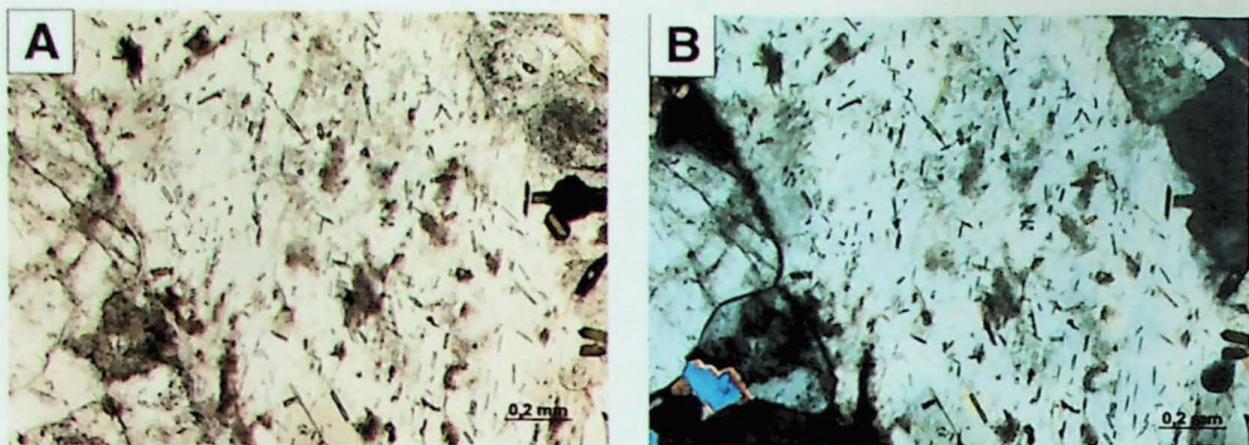


Figura 31: Fotomicrografia da área corresponde à região na qual foi realizado o imageamento eletrônico.

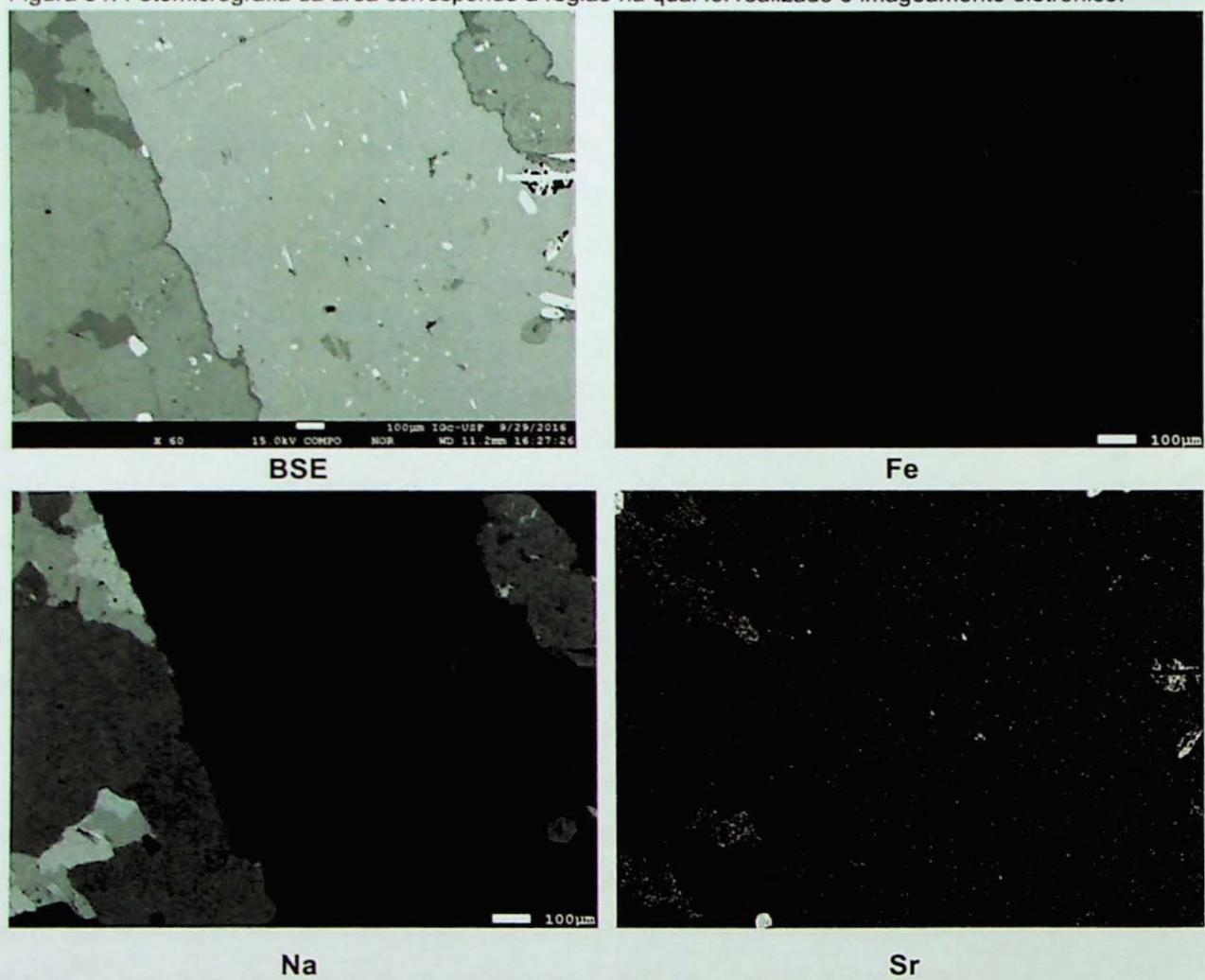


Figura 32: Imagens eletrônicas da amostra de chibinito por elétrons retroespelhados e mapas de Fe, Na e Sr.

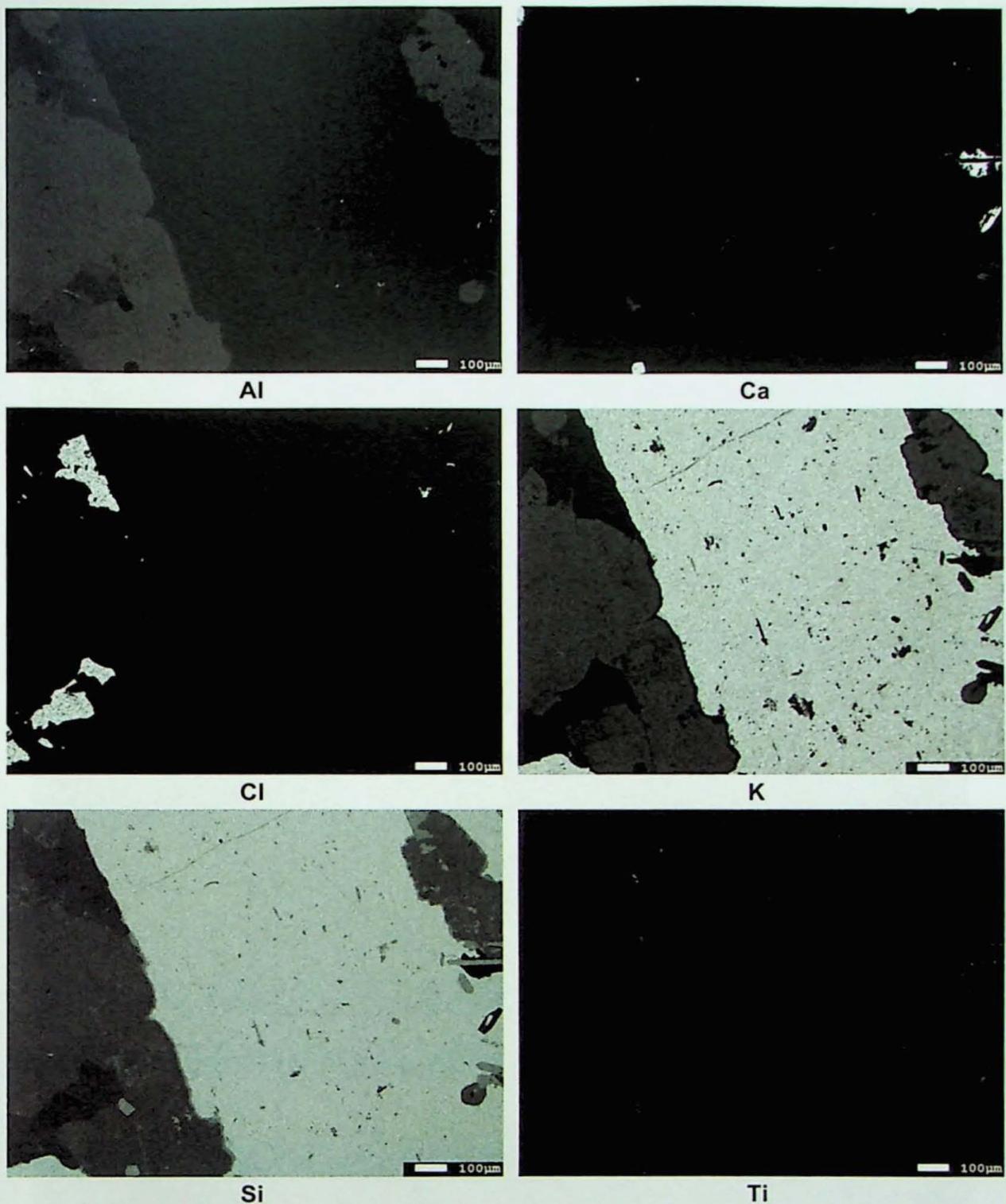


Figura 33: Mapas compositionais de Al, Ca, Cl, K, Si e Ti

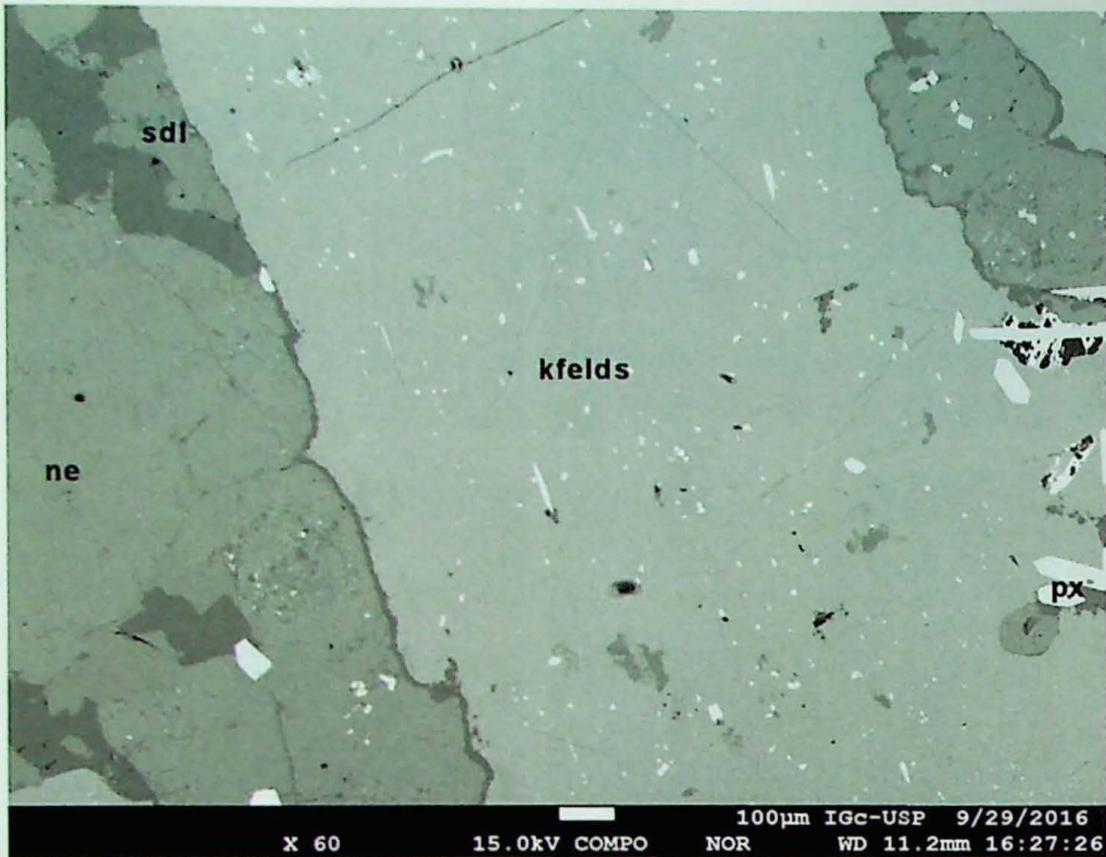


Figura 34: Imagem BSE da amostra de chibinito.

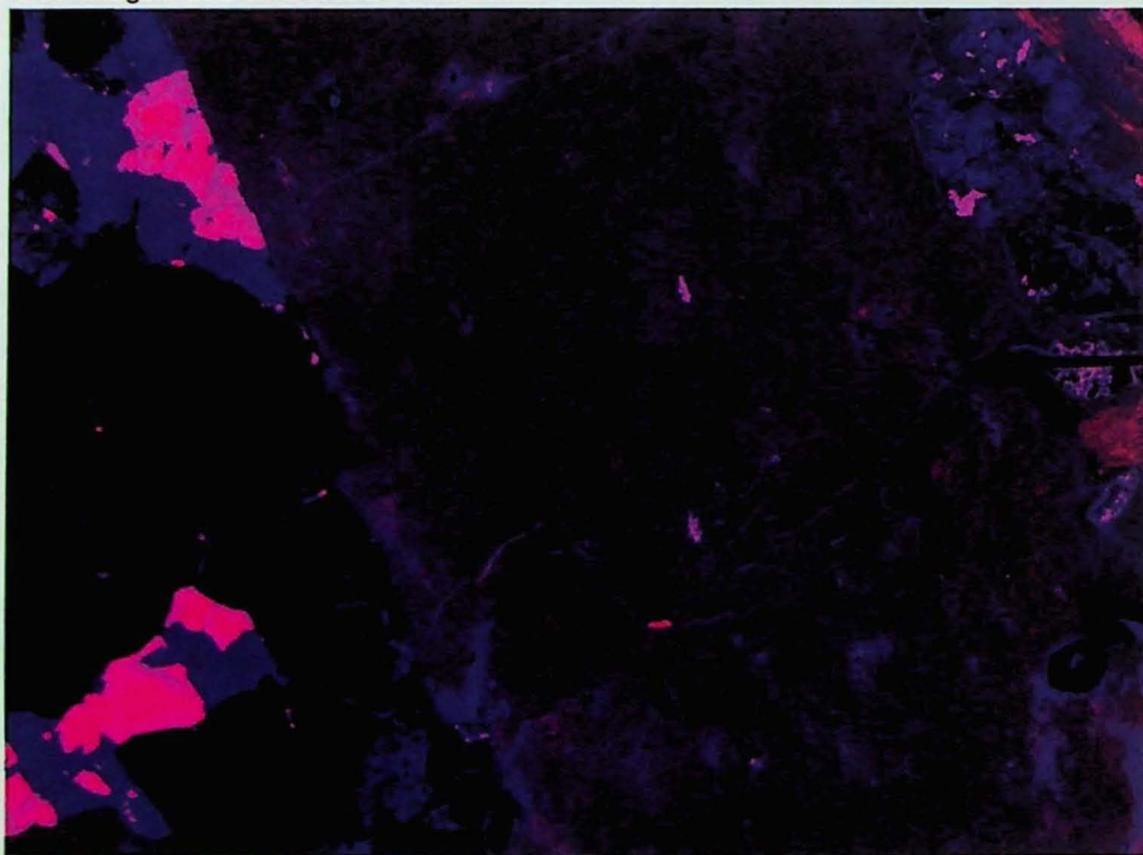


Figura 35: Composição colorida das imagens de CL da amostra de chibinito.

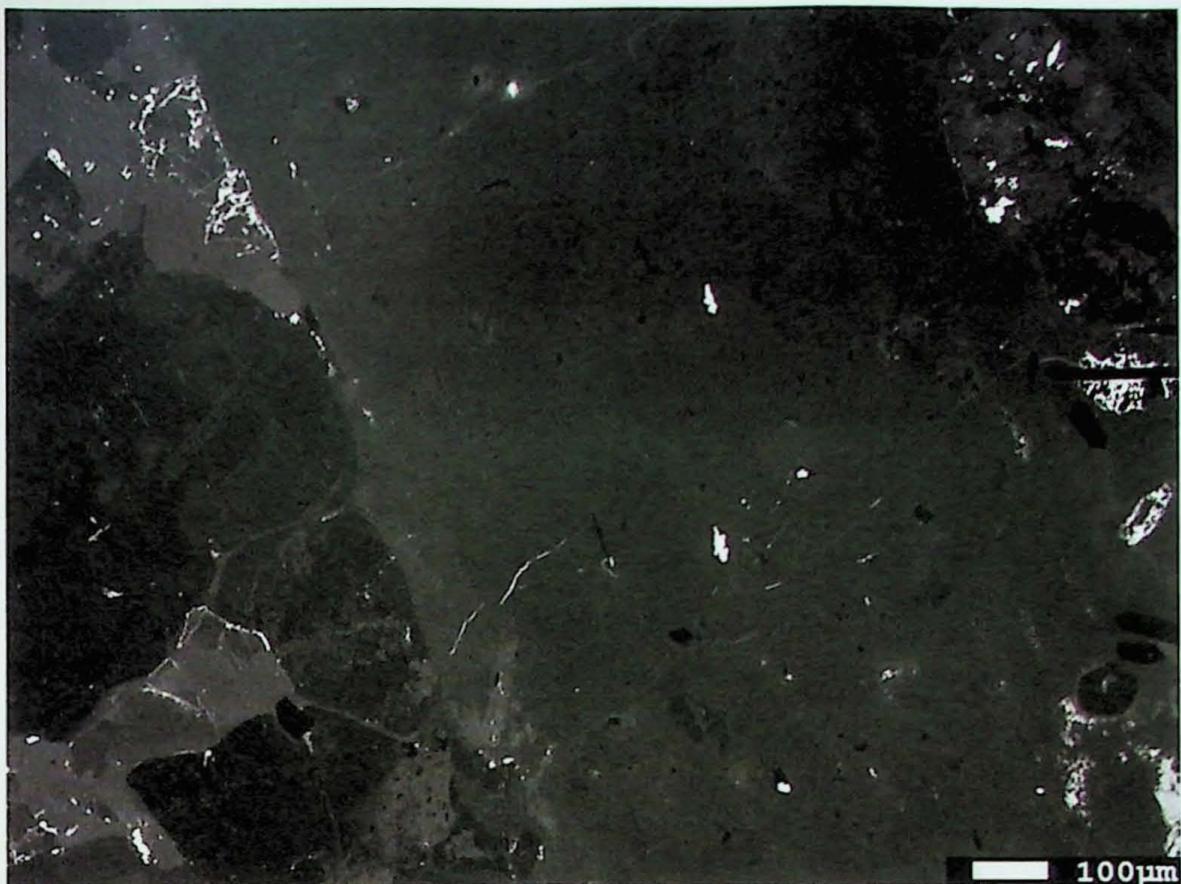


Figura 36: Imagem com filtro de cor azul da amostra de chibinito.



Figura 37: Imagem com filtro de cor vermelha da amostra de chibinito.

### 7.3.2 Nefelina sienito

A área imageada na amostra de nefelina sienito corresponde à Figura 38, onde pode ser observado um cristal de feldspato alcalino muito sujo, com algumas inclusões arredondadas de sodalita. Na área é possível ainda encontrar cristais de nefelina e sodalita, além de zeólitas (ocorrendo conjuntamente com a nefelina) e pectolita. Na imagem por elétrons retroespalhados (Figura 38) observa-se mais uma vez a presença de um material escuro intersticial entre o feldspato alcalino e as nefelinhas.

Nos mapas dos elementos (Figura 38 e Figura 39), nota-se que algumas nefelinhas possuem um núcleo relativamente rico em ferro. A borda empobrecida neste elemento parece ter se formado por cima do cristal original, uma vez que o formato interno do zoneamento não representa uma nefelina idiomórfica, mas o externo sim. Os feldspatos mais uma vez são fortemente potássicos, sem conteúdo de sódio ou cálcio. Nota-se ainda um forte conteúdo de cloro nas sodalitas. Além disso, é possível ver nessas imagens que a pectolita é relativamente enriquecida em titânico, estrôncio e (subordinadamente) em cloro. Os piroxênios mostram um leve zoneamento, com bordas enriquecidas em Ti e empobrecidas em Ca.

Na imagem por catodoluminescência (composição colorida na Figura 42 e imagens originais Figura 43 e Figura 44), nota-se no feldspato alcalino um padrão semelhante ao observado no chibinito: o cristal é bastante heterogêneo, com algumas zonas mais ricas em luminescência vermelha, outras predominantemente azuis e outras roxas (no caso, combinação de ambas às cores). Embora a luminescência azul ocorra em todo o cristal, ela tem intensidade mais fraca que a vermelha, que ocorre concentrada em porções do mesmo. Em certas porções, na composição colorida, a luminescência vermelha é tão intensa neste cristal que ofusca a presença da azul, só sendo possível constatá-la observando a imagem original. Observa-se que as zonas mais límpidas do feldspato são aquelas que se destacam menos luminescência vermelha.

A sodalita mostra a luminescência vibrante de cor rosa, com zonas mais avermelhadas, sugerindo a presença de algum tipo de alteração neste mineral. As nefelinhas exibem fraquíssima luminescência azul, quase não percebida na composição colorida; as zeólitas de alteração aparecem em um azul mais intenso. Os piroxênios não exibem nenhum tipo de luminescência.

A pectolita concentra uma fraca cor vermelha em seu interior e parece induzir um halo de luminescência azul nos cristais vizinhos, embora nenhuma correlação possa ser verificada nos mapas composticionais ou na imagem ótica.

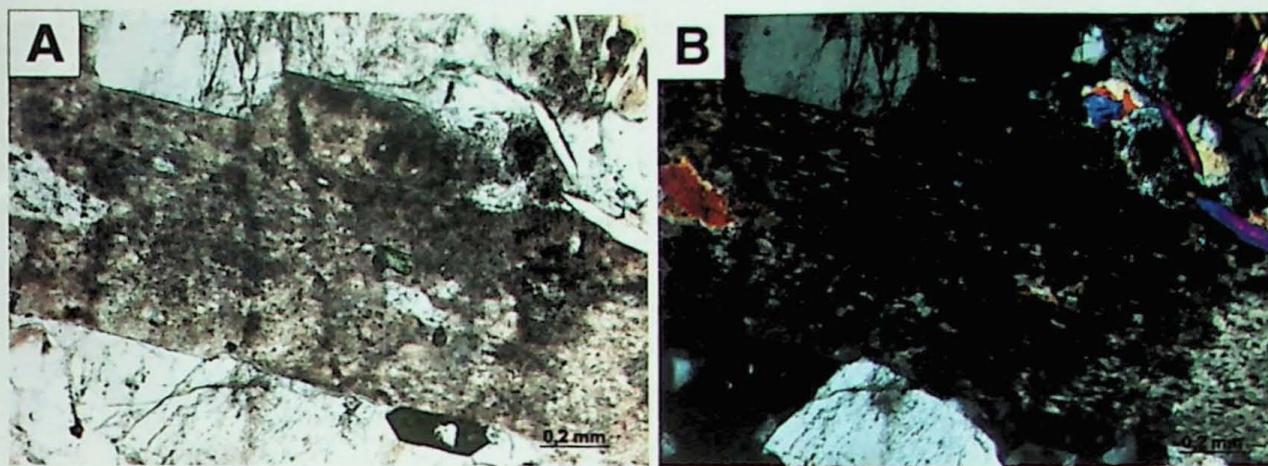


Figura 38: Fotomicrografia correspondente à região escolhida para as análises eletrônicas. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

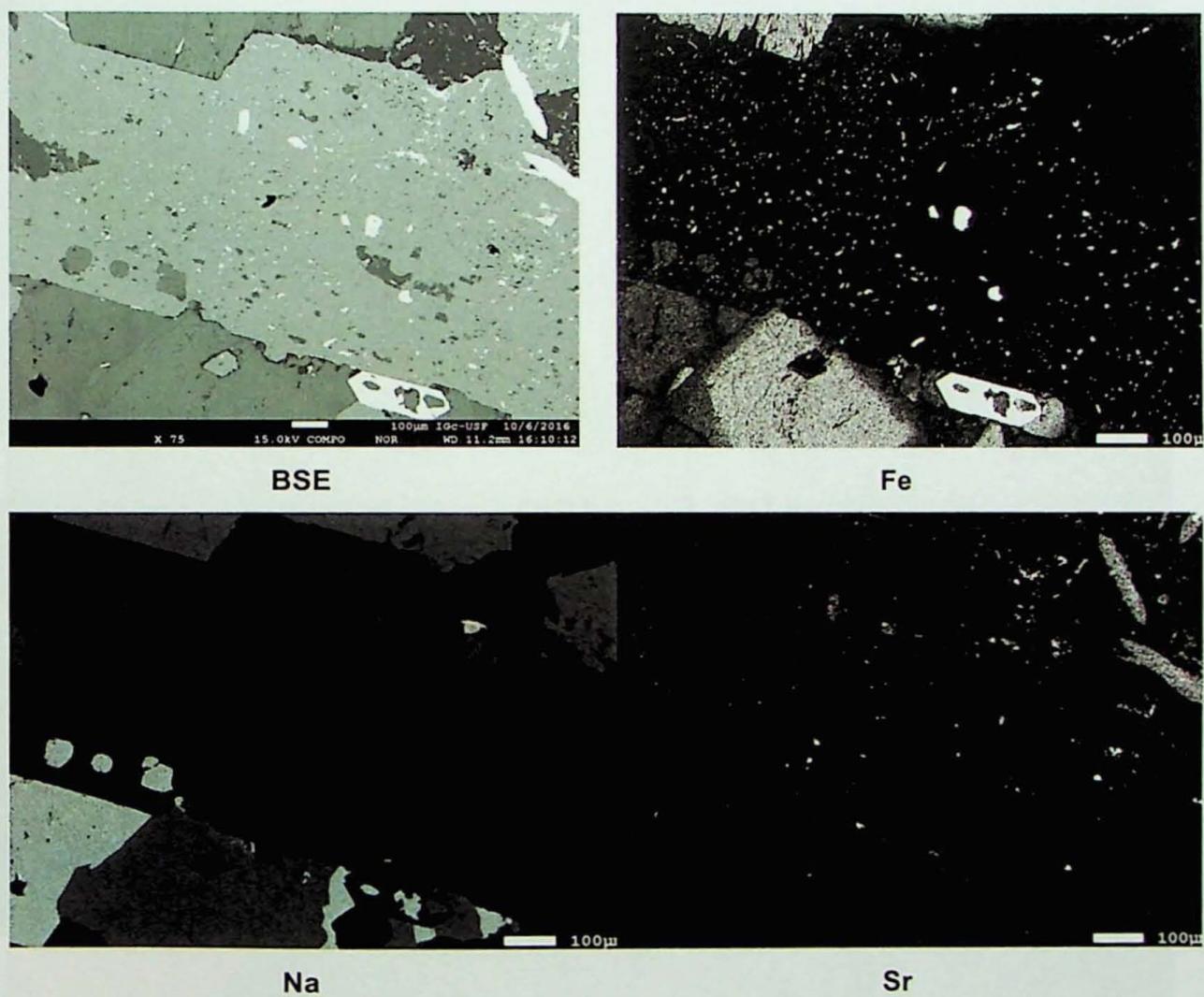


Figura 39: Imagens eletrônicas da amostra de nefelina sienito por elétrons retroespalhados e mapas de Fe, Na e Sr.

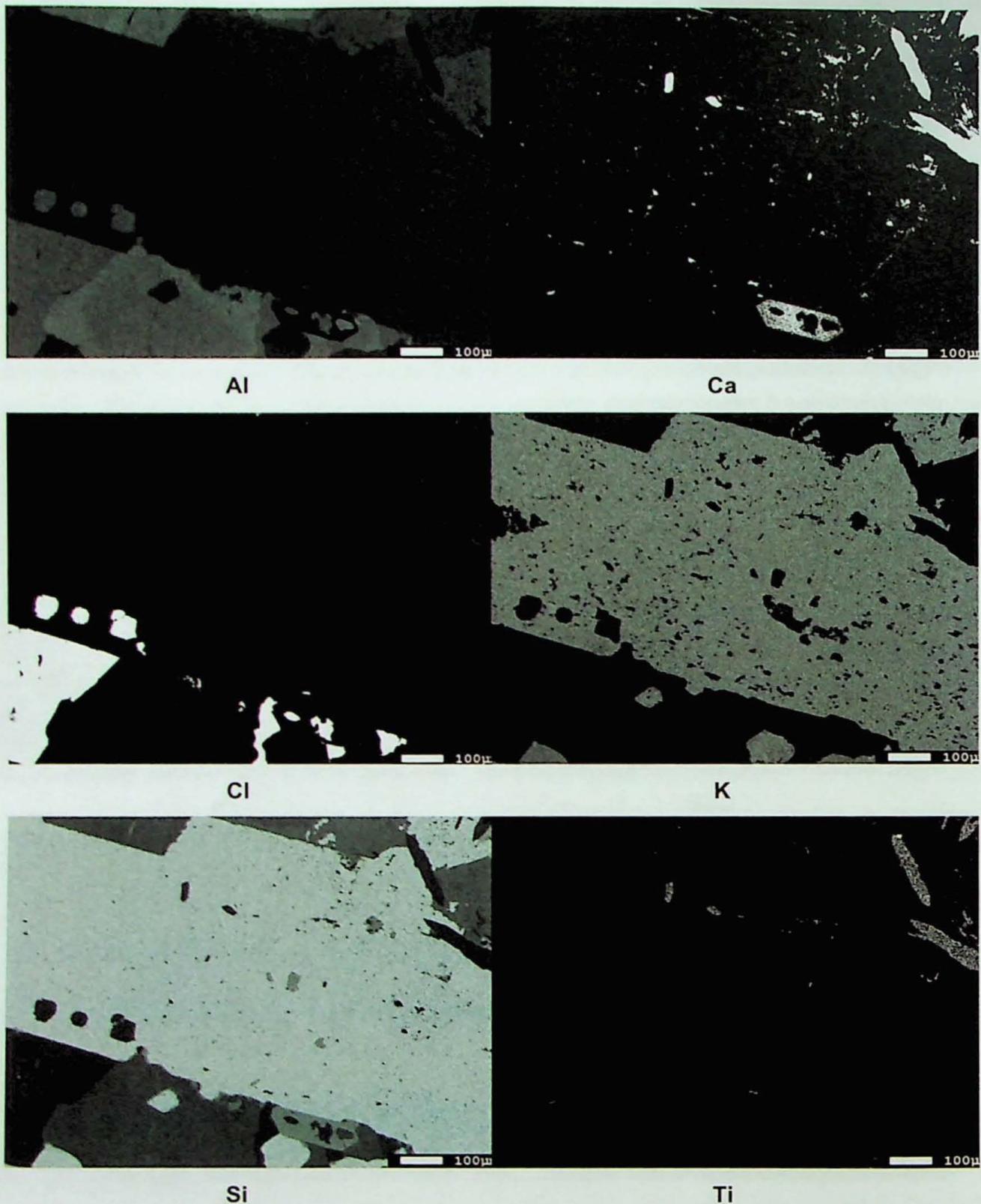


Figura 40: Mapas compositionais de Al, Ca, Cl, K, Si e Ti

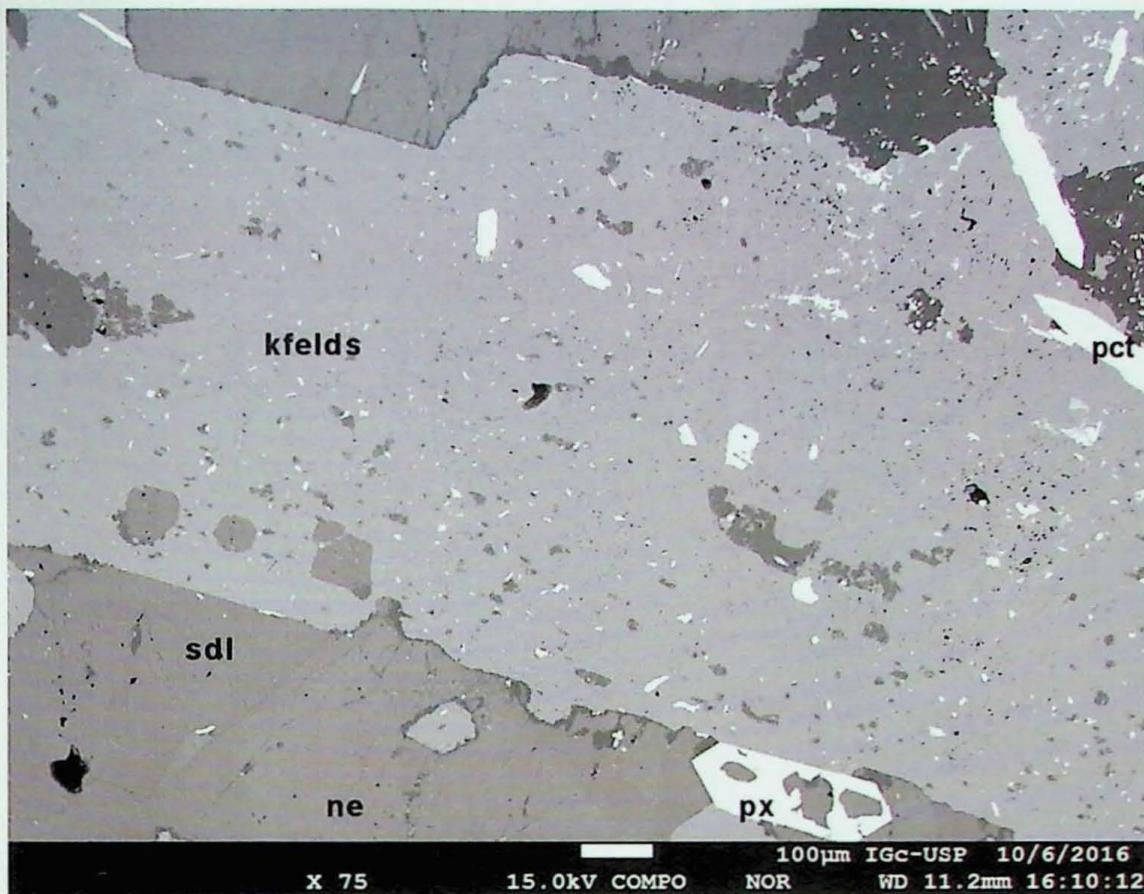


Figura 41: Imagem BSE da amostra de nefelina sienito.

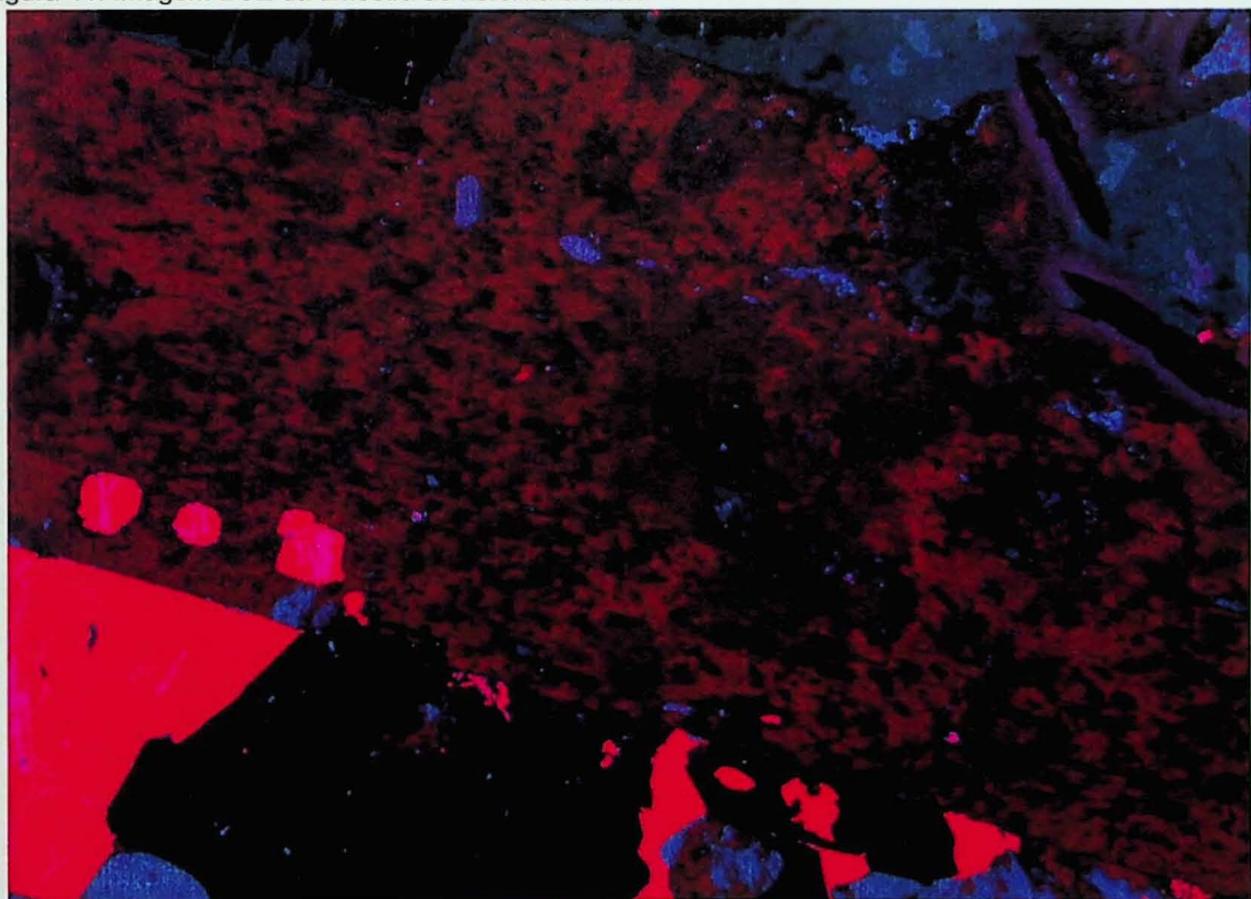


Figura 42: Composição colorida das imagens de CL da amostra de nefelina sienito.

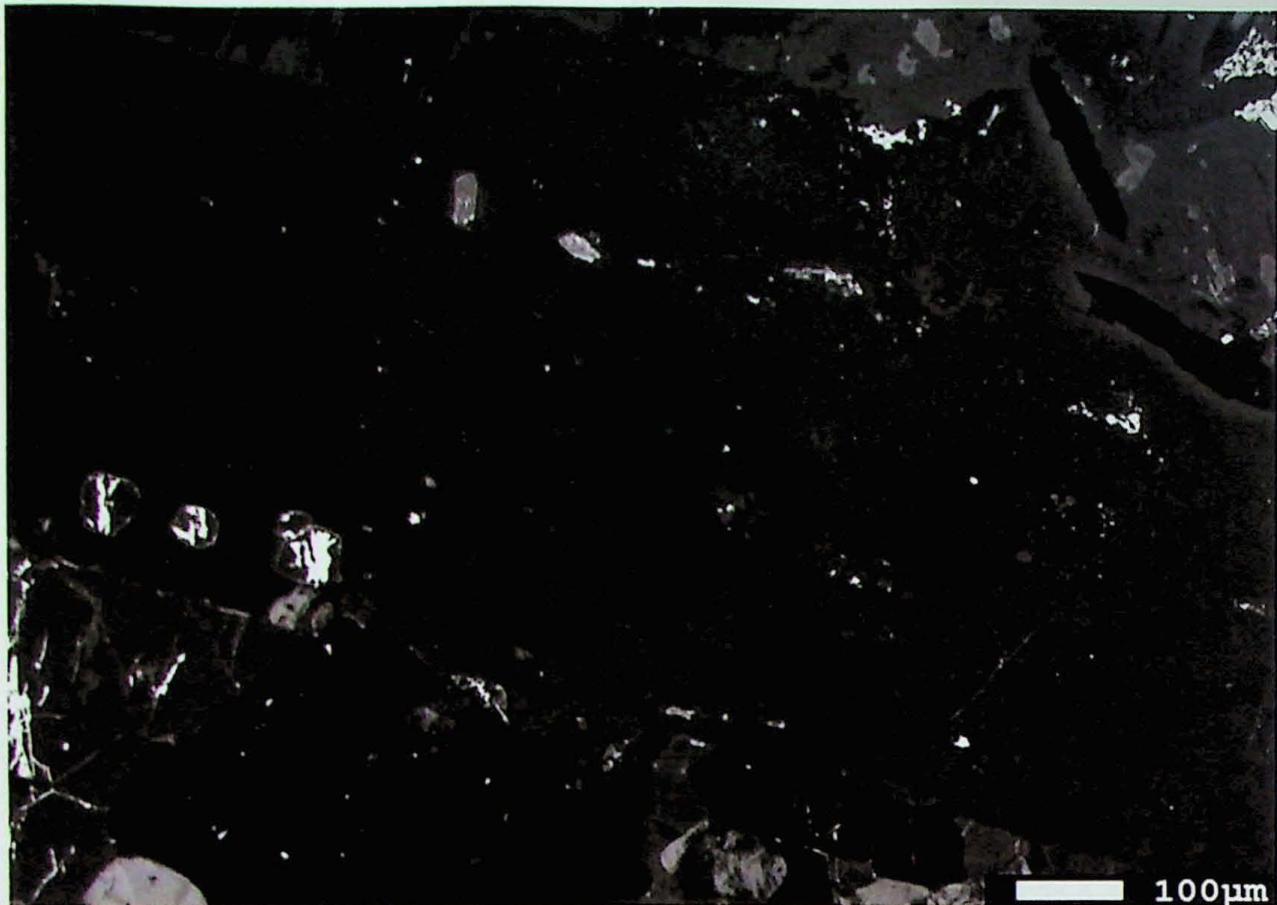


Figura 43: Imagem com filtro de cor azul da amostra de nefelina sienito.



Figura 44: Imagem com filtro de cor vermelha da amostra de nefelina sienito.

### 7.3.3 Lujaurito

Foram analisadas duas áreas diferentes na mesma amostra de lujaurito, uma focando em um cristal de nefelina e outra em um feldspato alcalino.

A primeira área (ver imagem ótica Figura 45) tem ao centro um grande cristal de nefelina, com uma borda de alteração muito clara, e envolvido pelas *folhas* de egirinas. Pequenos piroxênios são também observados no centro do cristal. Nos limites da imagem, aparecem ainda pequenos pedaços de feldspatos alcalinos.

Na Figura 46 por elétrons retroespelhados ressalta a diferença de composição da nefelina central e sua borda, diversas fraturas com preenchimento e inclusões de piroxênios ripiformes. A borda se sobrepõe às fraturas preenchidas, interceptando-as. Nota-se que os piroxênios produzem um halo de alteração na nefelina. Na parte superior da imagem e na lateral esquerda, a imagem registra ainda a borda de feldspatos vizinhos.

Nos mapas compostionais (Figura 46 e Figura 47), ressalta-se um zoneamento nos piroxênios, onde o núcleo é mais enriquecido em Ca do que a borda. Nas imagens de titânio e sódio esse zoneamento também pode ser observado, mas de forma menos intensa, com bordas com maior conteúdo destes elementos do que a região central. Também nota-se que há algum teor de cloro nos piroxênios. É de interesse ressaltar que a borda de alteração na nefelina possui composição muito diferente desta, sendo enriquecida em Ca e Sr e empobrecida em Na, K e Al em relação ao cristal original. No preenchimento das fraturas nas nefelinias, é possível perceber que há uma deficiência nos teores de Si, Al e K.

Na Figura 49 verifica-se a imagem por catodoluminescência correspondente (composição colorida com base na Figura 50 e Figura 51). Observa-se, primeiramente, que a nefelina central possui predominantemente luminescência azul, com alguma luminescência vermelha subordinada, no geral. As fraturas neste cristal, contudo, mostram luminescência fúcsia, uma combinação de azul e vermelho na qual o vermelho é a cor mais intensa detectada. A borda exibe unicamente a cor azul, variando sua intensidade. Piroxênios, como observado nas outras figuras, não possuem luminescência. As margens dos feldspatos, observadas na porção superior e lateral esquerda, mostram tanto luminescência azul quanto vermelha, relativamente homogeneizadas, sendo que nas bordas em contato com os piroxênios há uma exibição mais intensa de vermelho.

Na segunda região analisada (ver Figura 52, Figura 53 e Figura 54) há um cristal de feldspato tabular no centro, com bordas corroídas, e com dois cristais de nefelina nas laterais. No porção inferior da imagem existe ainda um outro feldspato, cujas bordas também foram corroídas, sendo possível encontrar até mesmo porções *ilhadas* entre a massa de alteração. A nefelina observada na esquerda mostra-se quase complementamente alterada, restando pouco do seu original. O cristal à direita é mais parecido com o descrito na figura anterior, com fraturas preenchidas e borda de alteração. Ressalta-se, no canto superior direito, um cristal de eudialita. Nota-se ainda que os piroxênios se encaixam preferencialmente nos contatos

entre os grãos; contudo, podem ocorrer também no interior dos mesmos. Os mapas mostram dois padrões dentro do cristal de feldspato, distinguíveis pelo teor de potássio. Demonstram também claramente a diferença composicional entre a nefelina e sua borda de alteração. O cristal original é mais rico em bário e cálcio, porém empobrecido em sódio (situação contrária à reconhecida na figura anterior). Verifica-se mais uma vez o zoneamento dos piroxênios (que novamente mostram algum teor de cloro), com núcleo rico em cálcio e bordas ricas em titânio e sódio.

Na análise por catodoluminescência (Figura 56, ver originais no anexo C, figuras 7 e 8) percebe-se que o cristal maior de feldspato possui ambas as luminescências, sendo que a azul ocorre de maneira mais homogênea. A luminescência vermelha ocorre fracamente no corpo do cristal, mas se concentra em tom de vermelho vibrante em fraturas, bem como em zonas internas associadas a estas e também nas bordas – as mesmas zonas correspondentes as regiões sujas e manchadas sob a luz plano polarizada. Nas nefelinas, como nas demais amostras, a única luminescência observada foi a de cor azul, variando a intensidade de acordo com o grau de alteração. Piroxênios não mostram luminescência.

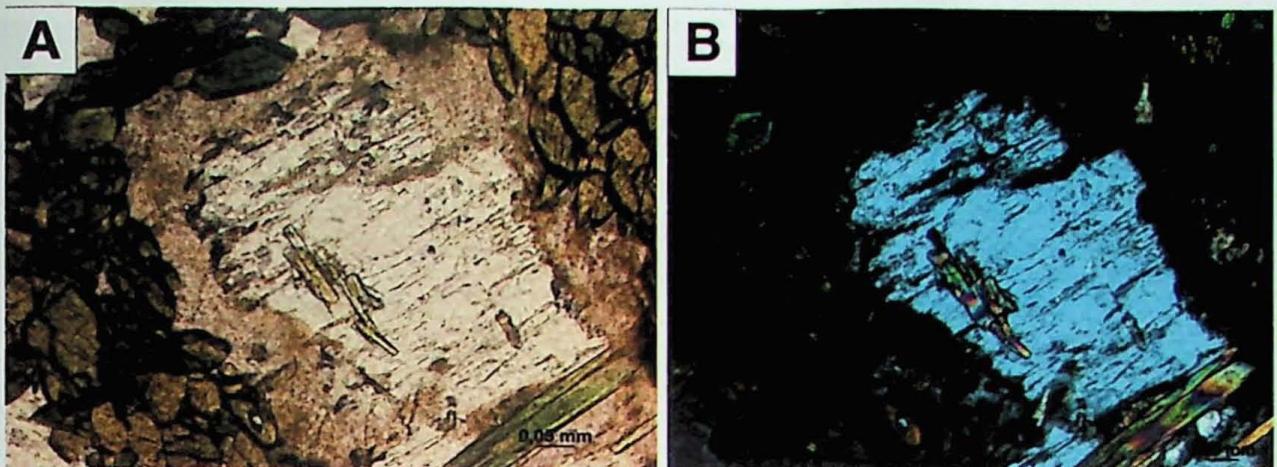


Figura 45: Fotomicrografia correspondente à região escolhida para as análises eletrônicas. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

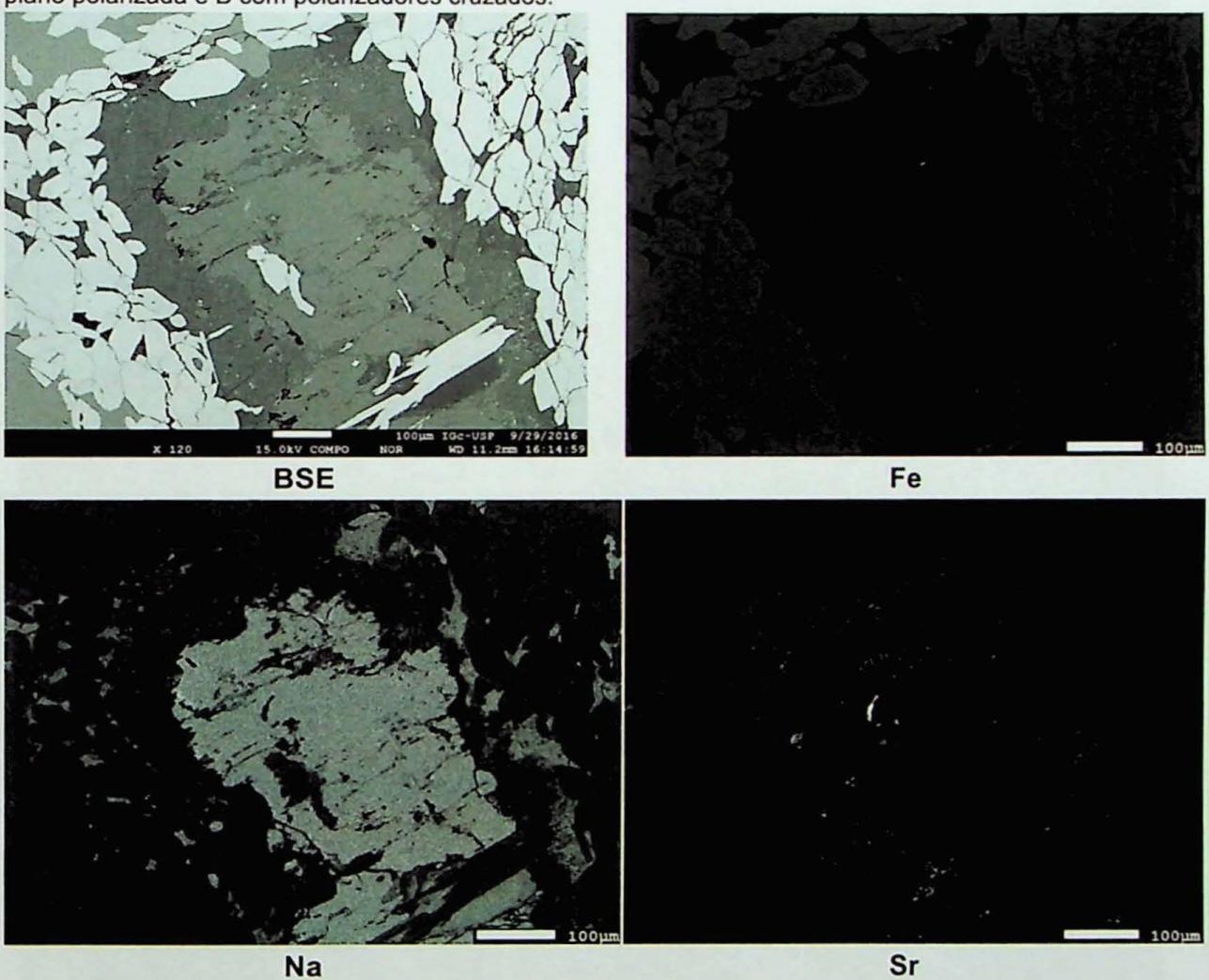


Figura 46: Imagens eletrônicas da amostra de lujauroito por elétrons retroespalhados e mapas de Fe, Na e Sr.

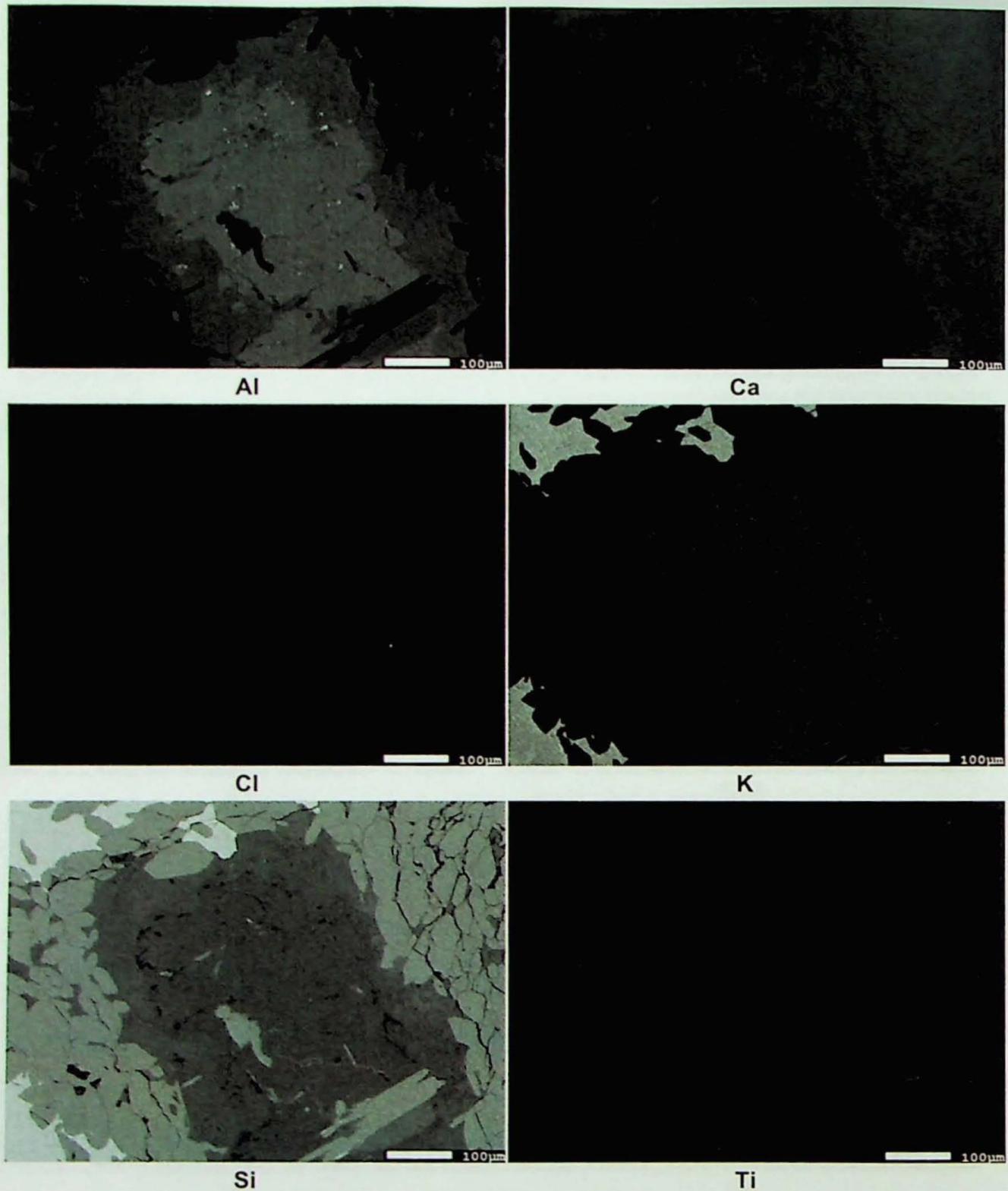


Figura 47: Mapas compositionais de Al, Ca, Cl, K, Si e Ti

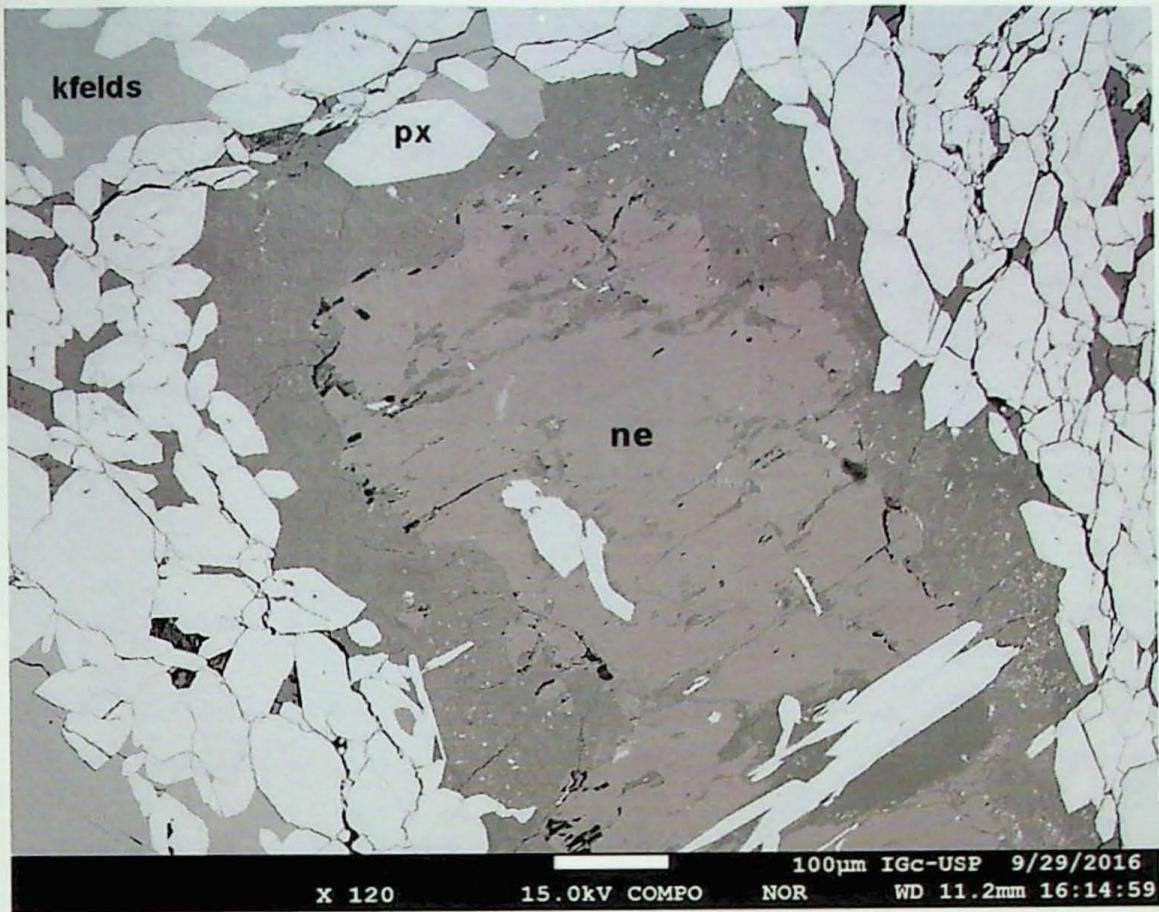


Figura 48: Imagem BSE da amostra de lujaurito.

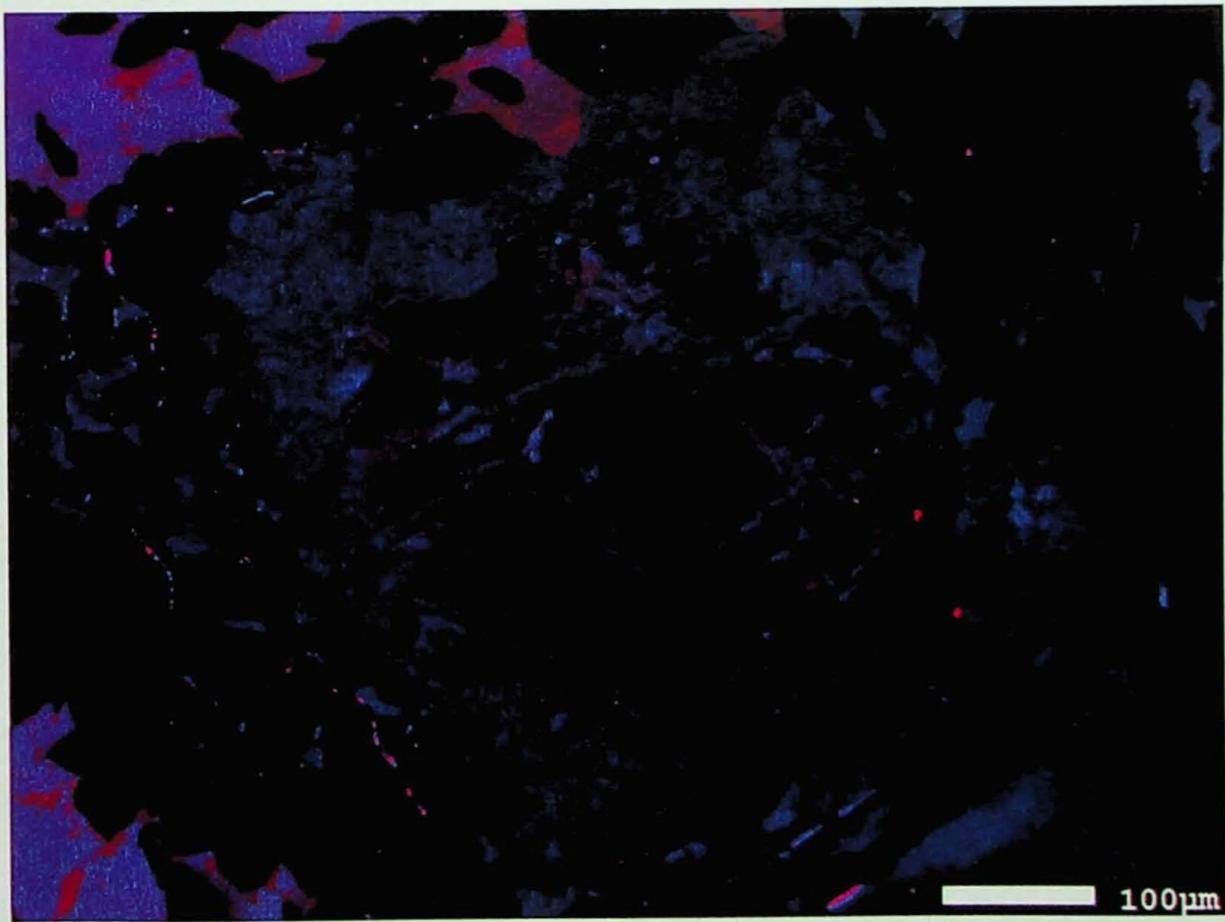


Figura 49: Composição colorida das imagens de CL da amostra de lujaurito.

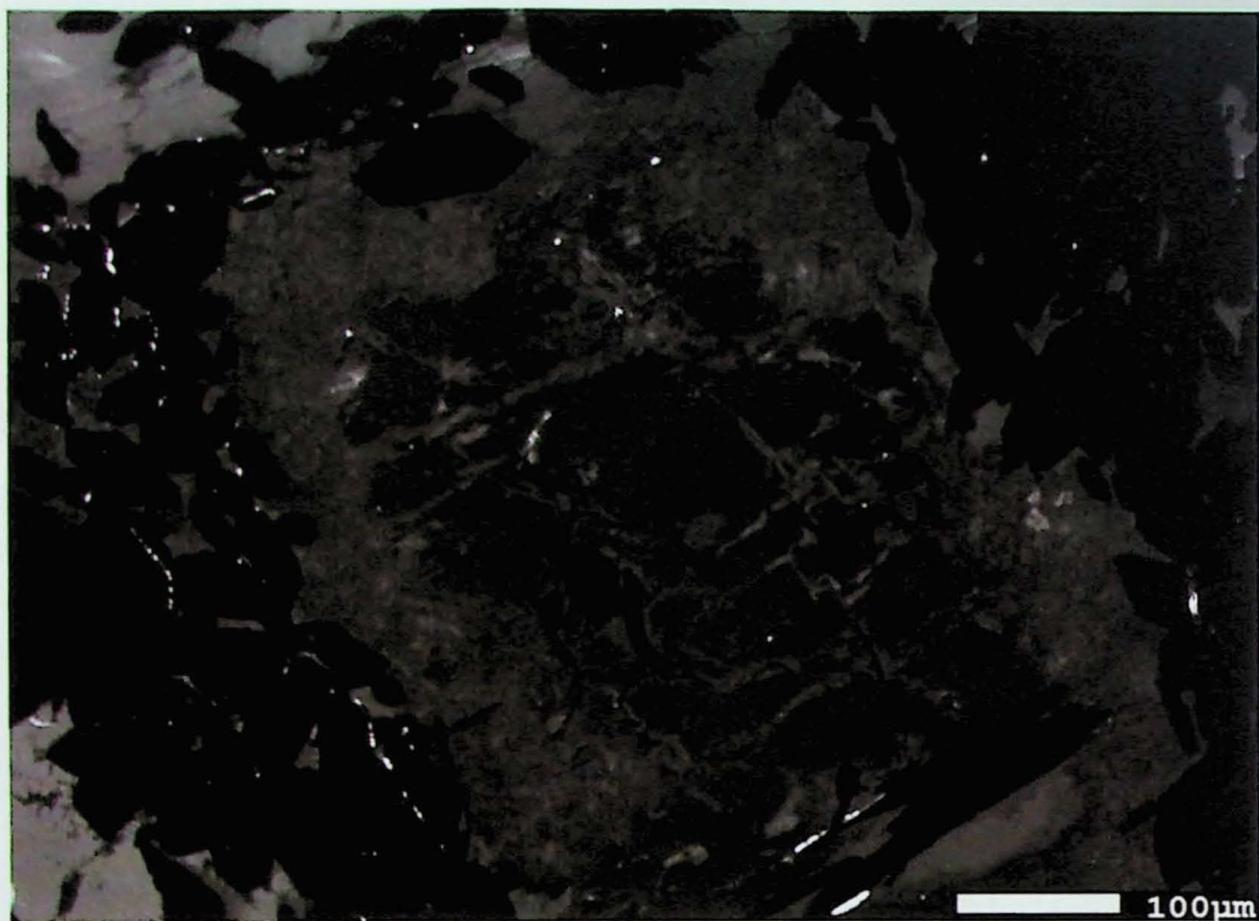


Figura 50: Imagem A com filtro de cor azul da amostra de lujaurito.



Figura 51: Imagem A com filtro de cor vermelha da amostra de lujaurito.

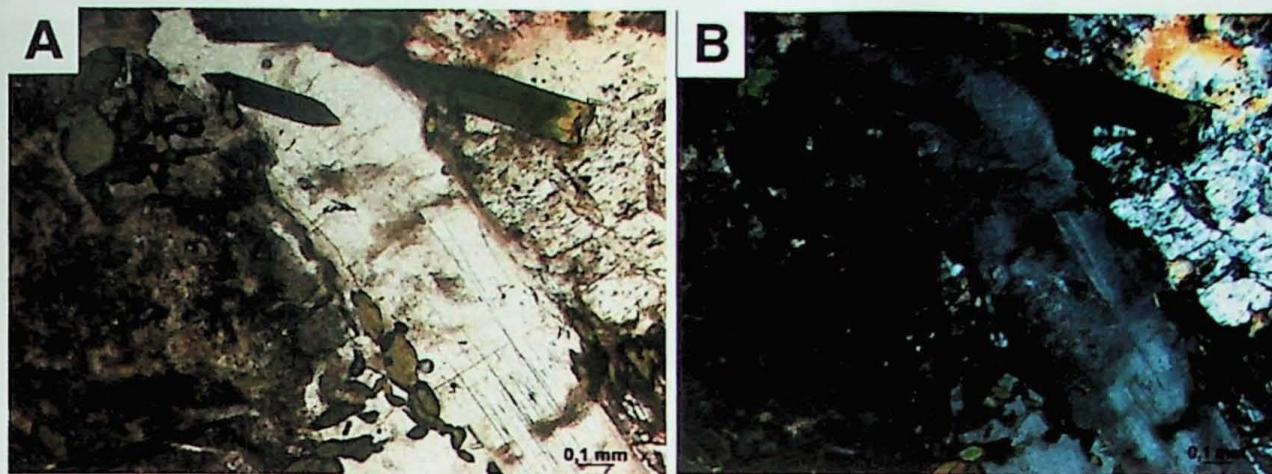


Figura 52: Fotomicrografia correspondente à região escolhida para as análises eletrônicas. Figura A com luz plano polarizada e B com polarizadores cruzados.

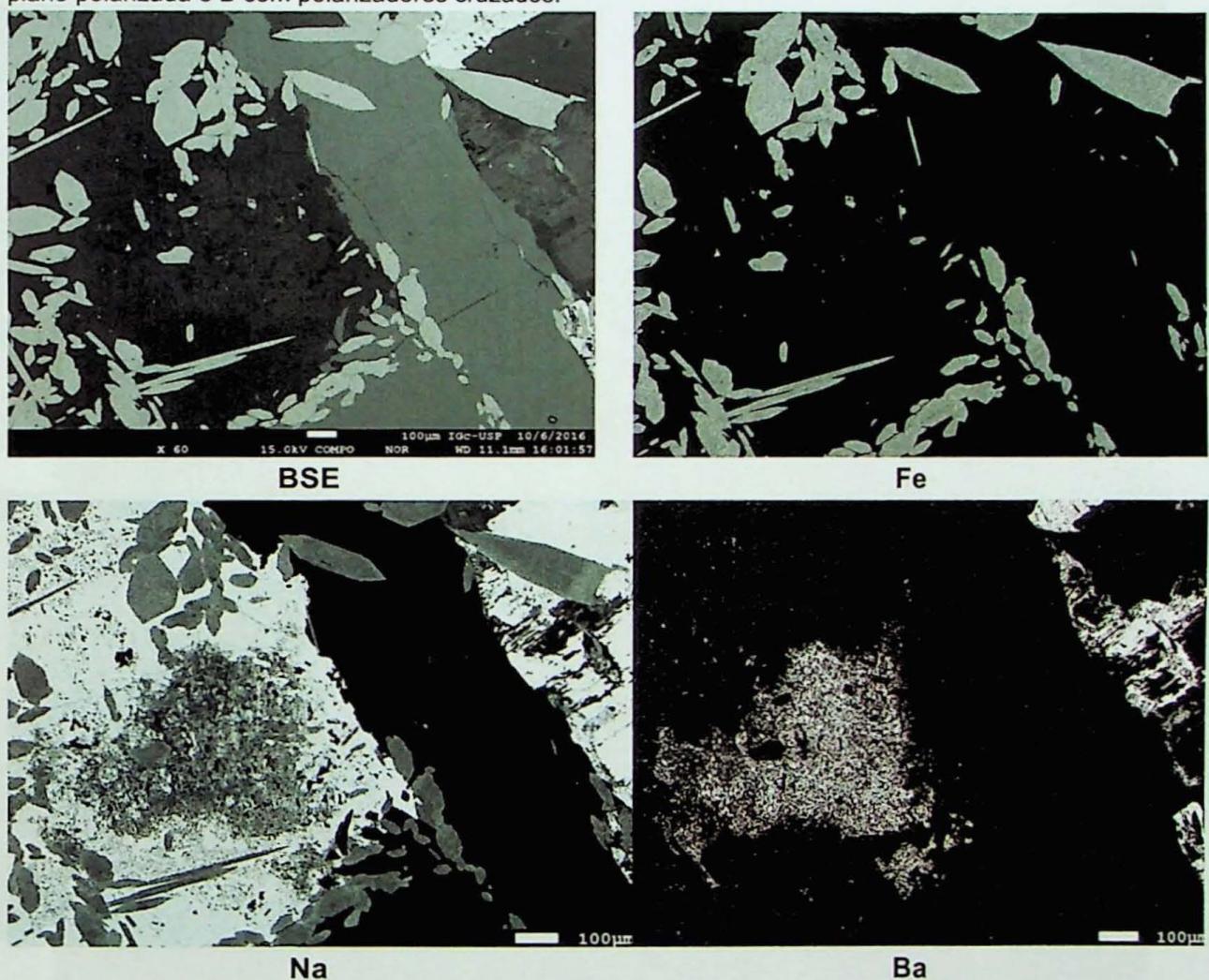


Figura 53: Imagens eletrônicas da amostra de lujaurito por elétrons retroespalhados e mapas de Fe, Na e Ba.

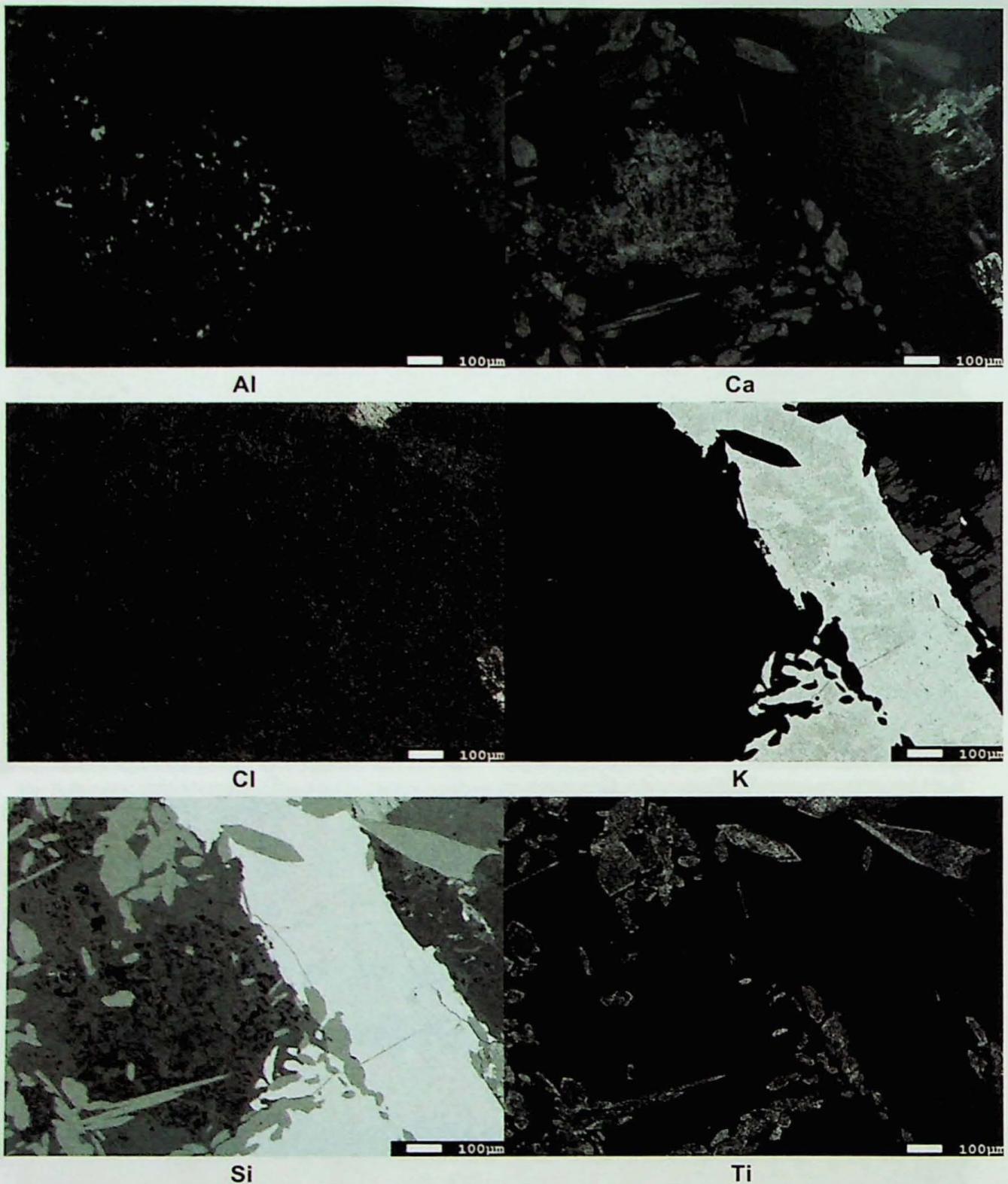


Figura 54: Mapas compositionais de Al, Ca, Cl, K, Si e Ti

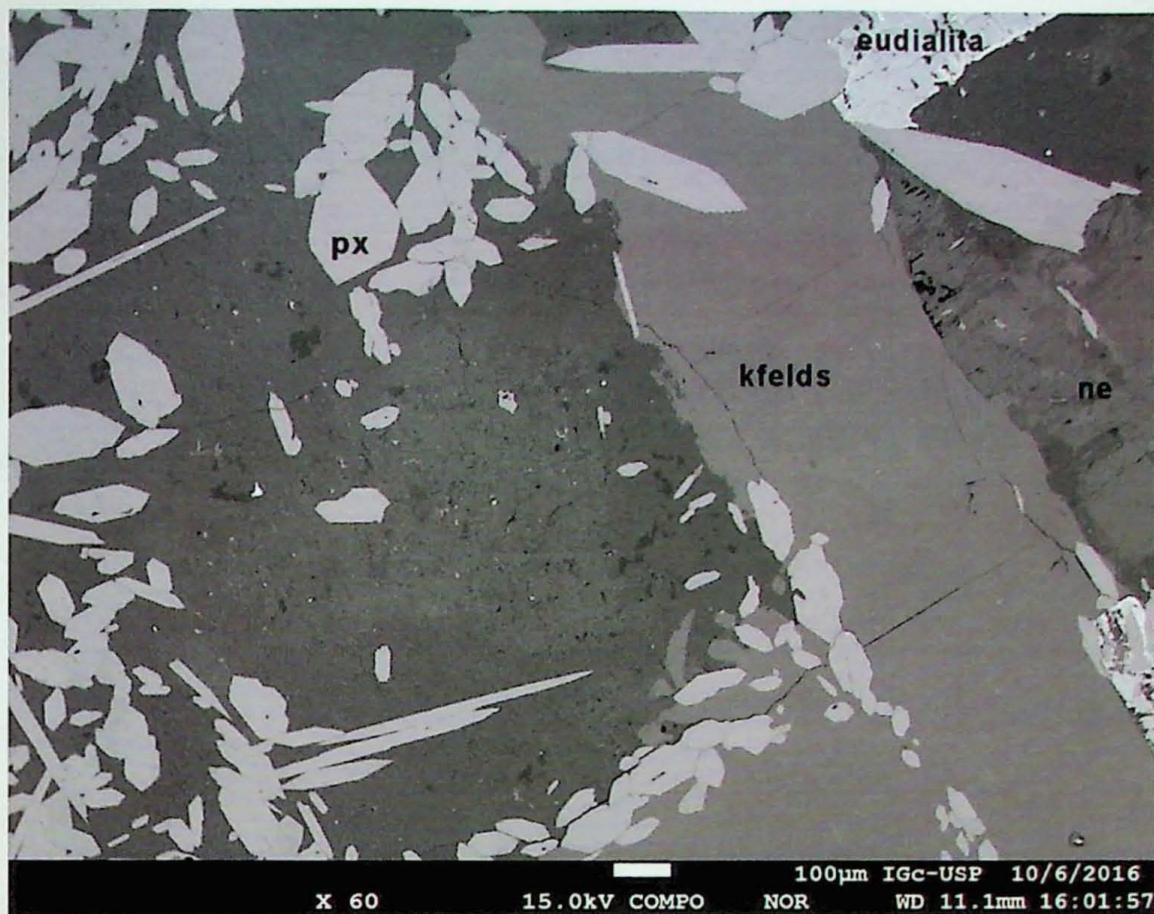


Figura 55: Imagem BSE da amostra de lujaurito.

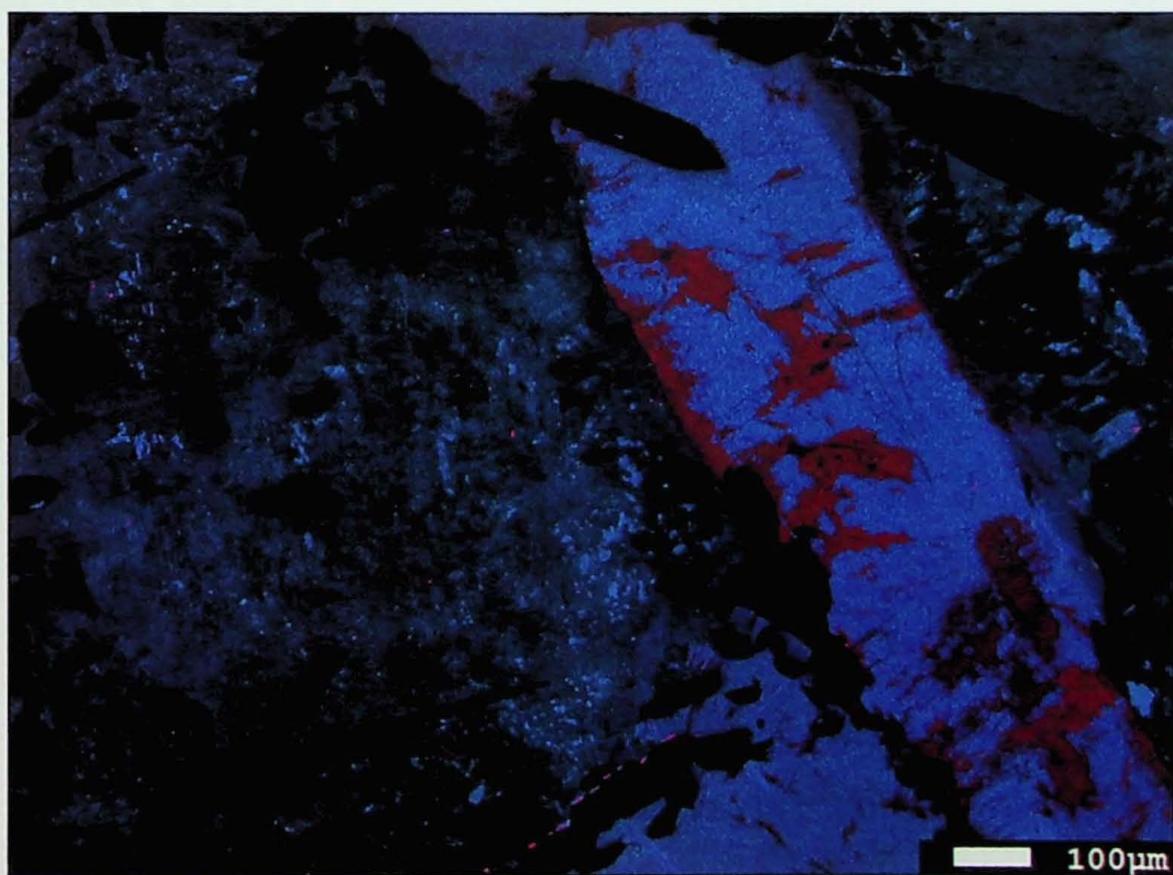


Figura 56: Composição colorida das imagens de CL da amostra de lujaurito.

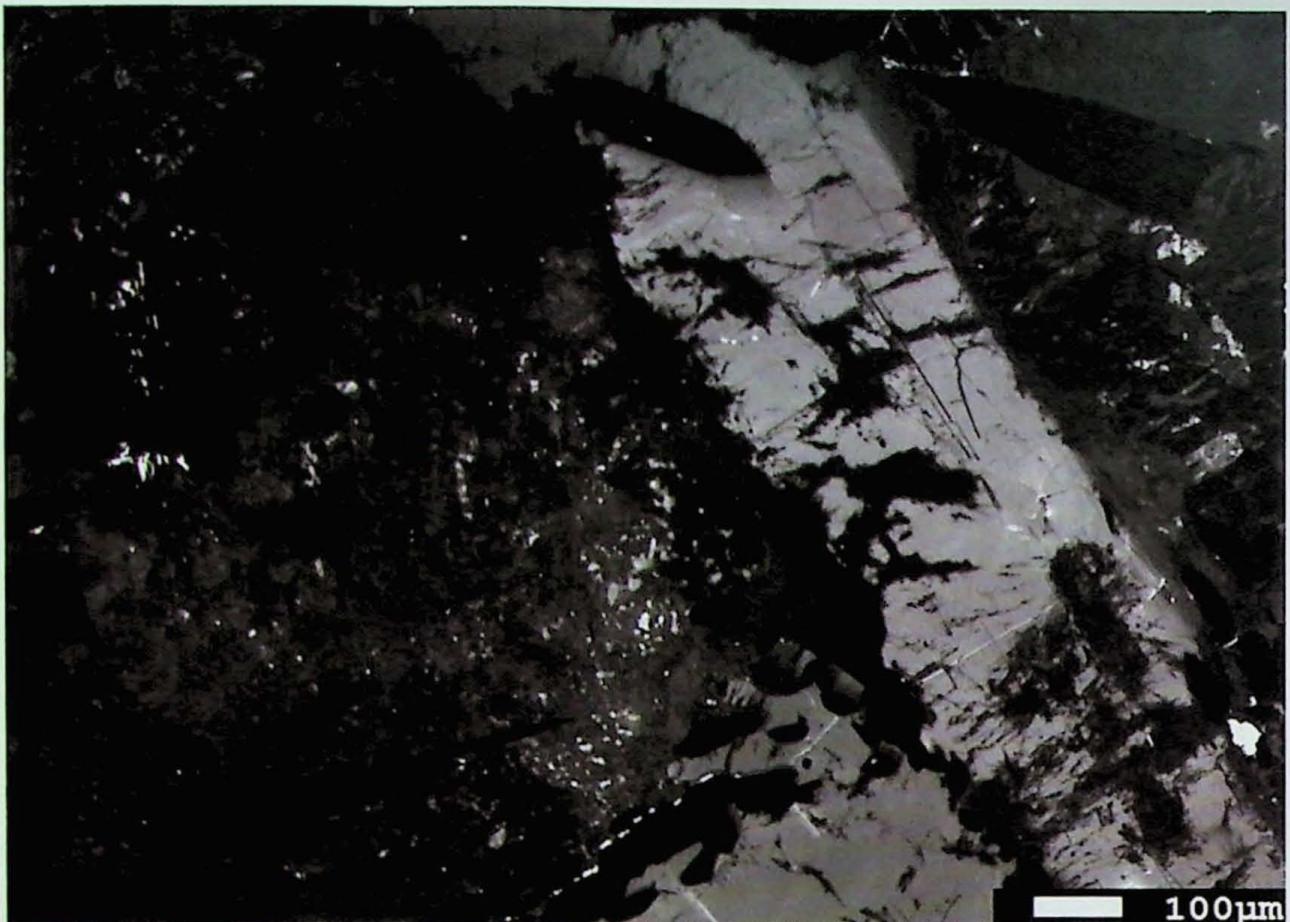


Figura 57: Imagem B com filtro de cor azul da amostra de lujaurito.



Figura 58: Imagem B com filtro de cor vermelha da amostra de lujaurito.

## 8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através da análise dos resultados obtidos na petrografia e nos imageamentos eletrônicos, é possível perceber que os dados aqui adquiridos são compatíveis com os estudos prévios nos aspectos que serão detalhados a seguir.

As análises mais interessantes, sem dúvida, são as dos feldspatos alcalinos. Em todas as figuras de catodoluminescência observadas, estes minerais exibem as cores azuis e vermelhas combinadas, com intensidade variáveis, mas sempre mantendo um padrão: a luminescência azul ocorre em todo o cristal, enquanto a vermelha é restrita a regiões, concentrando-se em algumas porções do cristal mais do que em outras. Ao comparar as imagens de catodoluminescência dos feldspatos alcalinos com as respectivas sob a luz da ótica convencional com luz plano polarizada, torna-se claro que as zonas tom vermelho mais intenso são as mesmas dos feldspatos que apresentam aspecto sujo, manchado – as mesmas zonas, descritas por Ulbrich (1983), como microclínicos. Este fato, relaciona o processo de mudança estrutural destes cristais (de ortoclásio – monoclinico – para microclínio – triclinico) com o mesmo que gerou a catodoluminescência vermelha. Essa relação, é condizente com o trabalho de Ulbrich (1993) que já havia presumido que a mudança estrutural dos feldspatos nestas rochas estaria relacionada a processos de percolação de fluidos.

A Figura 56, em especial, ressalta essa relação, e também sugere que essa alteração esteve relacionada à cristalização da segunda geração de piroxênios, devido a presença de uma fina borda de luminescência vermelha nos contatos dos feldspatos com as egirinas, mesmo naquelas inclusas. Essa relação também pode ser observada (embora de maneira menos óbvia) nas demais figuras de composição colorida.

Uma vez que a cor vermelha nos feldspatos alcalinos também está, provavelmente, associada à colocação tardia dos piroxênios de segunda geração em textura de *folhas* (e consequentemente à cristalização da massa de nefelina e zeólitas tardia), é possível supor que todos estes estes minerais foram formados mais ou menos simultaneamente, em um evento hidrotermal tardio, o que permite inferir que fatores hidrotermais foram importantes para a origem dos lujauritos.

Nas imagens de catodoluminescência, as nefelinias mostram quase sempre a cor azul, informação condizente com as poucas referências encontradas (Finch, 1991; Karakus e Moore, 2002). Em uma das imagens de lujaurito (ver Figura 49), contudo, a nefelina aparece com luminescências azul e vermelha combinadas, sendo a última mais fraca e dispersa. Embora não exista precedente para luminescência vermelha em nefelina, é possível supor que a ocorrência dessa cor no cristal pode estar relacionada à alterações por percolação posterior de fluidos, uma vez que a mesma possui diversas fraturas preenchidas com material de luminescência rosa (vermelha e azul combinadas). Ressalta-se aqui, que essa nefelina em questão possui uma borda de composição diferente com luminescência azul apenas e

associada aos diversos piroxênios que circundam os cristais. Essa borda é mais provavelmente tardia, não apenas pela luminescência e composições diferenciadas, mas porque aparece se sobrepondo às fraturas preenchidas no mineral, indicando que as mesmas já ali existiam quando a borda foi cristalizada. Dessa forma, pode-se supor que foi gerada pelo mesmo processo que gerou os piroxênios de segunda geração.

Os resultados observados nas sodalitas (luminescência vermelha e rosa vibrante) são condizentes com as informações dos trabalhos de Dumanska-Slowik et al (2015), Mariano, (1978), Marshall, (1988); além de possivelmente serem compatíveis com o estudo Finch (1991), que descreveu luminescência laranja para este cristal – que, aqui, não pode ser diretamente observada pela ausência de informação na banda verde. Contudo, os resultados obtidos não excluem a possibilidade de existência de catodoluminescência nessa cor.

No que diz respeito à composição dos cristais, nefelinas com teores variáveis em ferro e o zoneamento dos piroxênios de segunda geração detalhado pelos mapas compostionais estão de acordo com os estudos prévios dessas rochas (ver item 6.1.1), em especial os de Ulbrich (1983) e Gualda (1998).

Não há relatos de corpos alcalinos como este na literatura disponível, para efeitos de comparação mais precisos. O complexo que mais se aproxima, Khibina-Lovozero, na província Kola, na Rússia, possui também Iujauritos e chibinitos, mas que não ocorrem conjuntamente, como no caso do corpo Iujaurítico-chibinítico de Poços de Caldas. Além disso, a composição desse complexo é essencialmente diferente das rochas aqui estudadas, com ijolitos, urtitos, jucupirangitos (Dawson, 1996). No caso dos chibinitos russos, eles ainda se encontram em uma zona fenitização de um complexo carbonatítico (Dawson, 1996), cenário que não pode ser considerado para as rochas alcalinas de Poços de Caldas.

## 9. CONCLUSÕES

Com base nos resultados aqui obtidos, é possível sugerir uma relação entre as 4 feições tardias encontradas nas rochas Iujauríticas e chibiníticas de Poços de Caldas. Essas feições são: (1) a alteração da estrutura dos feldspatos alcalinos de ortoclásio para microclínio (monoclínico a triclinico), que sob a luz plano polarizada mostra-se na forma de manchas acastanhadas (descrita por Ulbrich, 1983); (2) a existência de manchas vermelhas sob a ótica da catodoluminescência nos feldspatos alcalinos, indicadora de alterações hidrotermais e que coincide com a região de mudança estrutural nestes minerais; (3) a cristalização de uma segunda geração de piroxênios que se encaixa em fraturas, geminações e contatos entre os minerais (descrita por Gualda, 1998); (4) a presença de uma massa de nefelina e zeólitas que se sobrepõe a um cristal de nefelina anterior e ocorre conjuntamente com os piroxênios tardios. É razoável supor que todos esses processos são produtos de um mesmo estágio hidrotermal, responsável pela cristalização tardia de piroxênios e nefelinas e pela alteração dos feldspatos alcalinos (consequentemente gerando as manchas vermelhas na CL). Dessa

forma, é possível crer em uma hipótese petrogenética com a presença de, pelo menos uma fase tardia hidrotermal – cenário este condizente com o proposto por Gualda (1998).

Além disso, as análises das imagens elétrons retroespelhados, catodoluminescência, mapas compositionais e da petrografia, revelam também:

Nefelina, quase sempre com luminescência azul, também pode ocorrer com algum grau de luminescência vermelha. Não é possível afirmar com certeza a origem desta cor neste mineral, mas supõem-se que, neste caso, esteja relacionada a percolação tardia dos mesmos fluidos que preencheram as fraturas no cristal. Estudos futuros podem verificar esta hipótese.

Zeólitas (natrolita e cacrinita, de acordo com Gualda, 1998) ocorrem na cor azul, relativamente intensas, dados até então inexistentes na literatura.

Reforça-se o padrão previamente descrito para os feldspatos alcalinos sob a ótica da catodoluminescência: cor azul parece estar associada à processos magmáticos; cor vermelha verifica-se correspondente à processos que alteraram tardivamente o cristal original.

No estudo de caso do corpo Iujaurito-chibinítico do anel norte do maciço alcalino de Poços de Caldas, os mapas compositionais confirmam as informações previamente disponíveis quanto a composição zonada dos piroxênios de segunda geração (Gualda, 1998) e à presença nefelinásicas ricas em ferro (Ulbrich, 1983).

Ressalta-se, como já evidenciado em literatura (ver revisão bibliográfica no item 6.2.2) o potencial da metodologia aqui empregada, especialmente no que respeito aos estudos em feldspatos alcalinos. Embora a amostragem aqui utilizada tenha sido relativamente limitada, este trabalho demonstra que os estudos sob a ótica da catodoluminescência tem potencial significativo para analisar transformações texturais e estruturais em feldspatos alcalinos e nefelinásicas, fornecendo suporte para a compreensão da evolução de rochas alcalinas.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, G. Bushee, J. Cordani, U. G. (1967). Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, 117-142.
- Arnal, F., Verdier, P., Vincensini, P. D. (1969). Coefficient de retrodiffusion dans de cas d'électrons monocinetique arrivant sur la cible sous une incidence oblique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 268, 1526-1529.
- Bjornberg, A. J. S. (1959). Rochas clásticas do planalto de Poços de Caldas. *Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras*, 237, 64-123.
- Brooks, R. J., Finch, A. A., Hole, D. E., Townsed, P. D., Wu, Z.L. (2002). The red to near-infrared luminescence in alkali feldspar. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143, 484-494.
- Bushee, J. (1971). *Petrographical and geochronological studies in alkaline rocks from the Southern Brazil*. Tese de Phd. Berkeley: Universidade da Califórnia.
- Claffy, E. W., Schulman, J. H. (1950). Luminescence activation of zeolite minerals by base exchange. *Geological Society of America Bulletin*, 61 (12), 1451.
- Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., Kinny, P. (2003). Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1), 469-500.
- Dawson, J. B. (1996). Alkaline Rocks and Carbonatites of the World. Part 2: Former USSR. *Mineralogical Magazine*, 60 (398), 238-239.
- Demars, C., Pagel, M, Deloule, E., Blanc, P. H. (1996). Cathodoluminescence of quartz from sandstones: interpretation of the UV range by determination of the trace element distribution and fluid inclusion P, T, X properties in authigenic quartz. *American Mineralogist*, 91, 891-901.
- De St. Jorre, L., Smith, D. G. W. (1988). Cathodoluminescent Ga-enriched feldspars from the Thor Lake rare-metal deposits, NW Territories, Canada. *The Canadian Mineralogist*, 26, 301-308.
- Dumanska-Slowik, M. A., Heflik, W., Pieczka, A., Sikorska, M., Dabrowa, L. (2015). The transformation of nepheline and albite into sodalite in pegmatitic mariupolite of the Oktiabrski Massif (SE Ukraine). *Spectrochimica Acta Part A - Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 150, 837-845.
- Ellert, R. (1959). *Contribuição a geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas*. São Paulo: Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo.
- Evans, K., Hogg, A. J. C., Hopkins, M. S., Howarth, R. J. (1994). Quantification of quartz cements using combined SEM, CL and image analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, A64, 334-338.
- Finch, A. A., Klein, J. (1999). The causes and petrological significance of cathodoluminescence emissions from alkali feldspars. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135, 234-243.

Finch, A. A. (1991). Conversion of nepheline to sodalite during subsolidus processes in alkaline rocks. *Minerological Magazine*, 55, 459-463.

Finch, A. A., Walker, D. L. (1991) Cathodoluminescence and microporosity in alkali feldspars from the Bla Mane So perthosite, South Greenland. *Minerological Magazine*, 55, 583-589.

Heirich, K. F. J. (1966). X-Ray Optics and Microanalysis.In: Castaing, R., Deschamps, P., Philibert, J. (Eds). *Proceedings of the 4th International Conference on X-ray Optics and Microanalysis*. Paris: Herman.

Goldstein, J., Newbury, D., Echlin, P., Joy, D., Fiori, C., Lifshin, E., (1981). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Nova Iorque: Springer.

Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., Michael, J. (2007). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (3a ed). Nova Iorque: Springer.

Google Earth. (2016). Imagem de satélite da região de Poços de Caldas. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acesso em Julho, 2016.

Gotze, J. Kempe, U. (2008). A comparison of optical microscope- and scanning electron microscope-based cathodoluminescence (CL) imaging and spectroscopy applied to geosciences. *Minerological Magazine*, 72 (4), 909-924.

Gotze J., Krbetschek M.R., Habermann D., Wolf, D. (2000). High-resolution cathodoluminescence studies of feldspar minerals. In: Pagel M., Barbin V., Blanc P., Ohnenstetter D. (Eds.).*Cathodoluminescence in geosciences*.Heidelberg: Springer.

Gotze, J. (2009). Cathodoluminescence microscopy and spectroscopy of lunar rock and minerals. In: Gucsik, A. (Ed.), *Cathodoluminescence and its Application in the Planetary Sciences*. Berlim: Springer-Verlag.

Gualda, G. A. R. (1998). *Variações químicas em minerais maficos e a evolução do Corpo Lujauruítico-Chibinítico do anel norte – Maciço Alcalino de Poços de Caldas (MG-SP)*. Monografia de Trabalho de Formatura. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Hassib, A., Beckman, O., Annersten, H. (2001). Photochronic properties of natural sodalite. *Journal of Physics D Applied Physics*, 10(5), 771.

Hanchar, J. M., Rudnick, R. L. (1995). Revealing hidden structures: the application of cathodoluminescence and back-scattered electron imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths. *Lithos*, 36, 289-303.

Joshi, M. S., Bhoskar, B. T. (1983). Luminescence Studies on Zeolite Crystals. *Crystal Research & Technology*, 18(2), 213-218.

Le Maitre, R. W. (2002). *Igneous rocks: A classification and glossary of terms*. (2a ed). Cambridge: Cambridge University Press.

Kanaya, K., Okayama, S. (1972) Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 5 (1), 43–58.

Karakus, M., Moore, R. E. (2002) Cathodoluminescence (CL) microscopy application to refractories and slags. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol 1 (1), pp 11-29. doi: 10.4236/jmmce.2002.11002.

Marfunin, A. A., Bershov, L. V. (1970). Electron-hole centers in feldspars and their possible crystal-chemical petrological significance. (Em russo). *Dokl Akad Nauk*, 193, 412-414.

Mariano, A. N. (1976). The application of cathodoluminescence for carbonatite exploration and characterization. In: *Anais do Simpósio de Carbonatitos em Poços de Caldas*. Poços de Caldas, Brasil.

Mariano, A. N. (1978). The application of cathodoluminescence for carbonatite exploration and characterization. In: Braga CJ (Ed). *Proceedings of the International Symposium on Carbonatites, 1st, Pocos de Caldas, Minas Gerais, Brasil*. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 39-57.

Mariano A. N. (1988). Some further applications of cathodoluminescence, In: Marshall D. (ed) *Cathodoluminescence of geological materials*. pp 94-123, Unwin Hyman, Boston, Estados Unidos.

Mariano, A. N., King, P. J. (1975). Europium-activated cathodoluminescence in minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39 (5), 649-660.

Martins, T.; Castro, N.; Vieira.R.; Noronha, F. (2007). Catodoluminescência como ferramenta complementar aos estudos petrográficos. 258-261. VI Congresso Ibérico de Geoquímica. Vila Real, Portugal.

Marshall, D. J. (1988). *Cathodoluminescence of Geological Materials*. Londres. 146p.

Newbury, D. E., Myklebust, R. L. (1991). In: Howitt, D. G. (Ed) *Microbeam analysis* (561-564). San Francisco: San Francisco Press.

Pagel, M., Barbin, V., Blanc, P., Ohnenstetter, D., (2000). Cathodoluminescence in Geosciences: An introduction. In: Pagel, M., Barbin, V., Blanc, P., Ohnenstetter, D. (Eds) *Cathodoluminescence in Geosciences* (1-22). Heidelberg: Springer.

Prior, D. J., Boyle, A. P., Brenker, F., Cheadle, M. C., Day, A., Lopez, G., Peruzzo, L., Potts, G. J., Reddy.S., Spiess, R., Timms, N. E., Trimby, P., Wheeler, J., Zetterstrom, L. (1999). The application of electron backscatter diffraction and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks. *American Mineralogist*, 84, 1741-1759.

Rae D.A., Chambers A.D. (1988). Metasomatism in the North Qoroq centre, South Greenland: cathodoluminescence and mineral of alkali feldspars. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 79, 1–12.

Reed, S. J. B. (2005). *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. Cambridge: Cambridge University Press.

Remond, G., Phillips, M. R., Roques-Carmes, C. (2000). Importance of instrumental and experimental factors on the interpretation of cathodoluminescence data from wide band gap materials. In: Pagel, M., Barbin, V., Blanc, P., Ohnenstetter, D. (Eds) *Cathodoluminescence in Geosciences* (59-160). Heidelberg: Springer.

Schipper, D. J., Van Doom, C. Z., and Bolwijn, P. T. (1972). Preparation of Cathodochromic Sodalites. *Journal of the American Ceramic Society*, 55, 256-259.

Slaby, E., De Campos, C. R., Majzner, K., Simon, K., Gros, K., Moszumanska, I., Jokubauskas, P. Feldspar megacrysts from the Santa Angelica composite pluton - formation/transformation path revealed by combined CI, Raman and LA-ICP-MS data. Não publicado.

Ulbrich, H. H. G. J. (1984). *A petrografia, a estrutura e o químismo de nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP*. Tese de Livre Docência. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Ulbrich, H. H. G. J., Vlach, S. R. F., Ulbrich, M. N. C., Kawashita, K. (2002). Penecontemporaneous syenitic-phonolitic and basic-ultrabasiccarbonatitic rocks at the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil: geologic and geochronologic evidence. *Revista Brasileira de Geociências*, 32 (1), 15-26.

Ulbrich, H. H. G. J. Vlach, S. R. F. Demaiffe, D. Ulbrich, M. N. C. (2005). Structure and origin of the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil. In: Comin-Chiaromonti, P. Gomes, C. B. (Eds). *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo: EDUSP. 367-418.

Ulbrich, H. H., Ulbrich, M. N. C. (2000). The Iujavrite and khibinite bodies in the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil: a structural and petrographic study. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4): 615-622

Ulbrich, M. N. C. (1983). *Aspectos mineralógicos e petrológicos de Nefelina Sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP*. Tese de Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Ulbrich, M. N. C. (1993). Mineralogy of nepheline syenites from Poços de Caldas Alkaline Massif, SE Brazil: chemistry, X-ray data and microtextures of feldspar. *Revista Brasileira de Geociências*, 23(4), 388-399.

Yacobi, B.G., Holt, D.B. (1990). *Cathodoluminescence microscopy of inorganic solids*. Nova Iorque: Springer.

