UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

MINERAIS DE ETR NO COMPLEXO CARBONATÍTICO DE BAILUNDO (MUNGO, ANGOLA): OCORRÊNCIA, COMPOSIÇÃO E SIGNIFICADO ECONÓMICO

Andreia Raquel Coelho Beleque

Mestrado em Geologia
(Geoquímica, Mineralogia e Petrologia)

2010

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

MINERAIS DE ETR NO COMPLEXO CARBONATÍTICO DE BAILUNDO (MUNGO, ANGOLA): OCORRÊNCIA, COMPOSIÇÃO E SIGNIFICADO ECONÓMICO

Andreia Raquel Coelho Beleque

Mestrado em Geologia
(Geoquímica, Mineralogia e Petrologia)

Dissertação orientada pelo Professor Doutor António Manuel Nunes Mateus

2010

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

I. INTRODUÇÃO 1

II. MINERAIS DO GRUPO DAS TERRAS RARAS 5

II.1 Introdução 5

II.2 Minério e Minerais 6

II.3 Propriedades e Aplicações 8

II.4 Tipos de Depósitos 10

II.4.1 Ígneos 10

II.4.2 Sedimentares 13

II.4.3 Enriquecimento Residual e Supergénico 14

II.5 Reservas Mundiais e Perspectivas Económicas 14

II.5.1 Enquadramento Histórico da Indústria de ETR 14

II.5.2 Situação Económica Actual e Perspectivas Futuras 16

III. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO 19

IV. CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA 27

IV.1 Introdução 27

IV.2 Sinopse da Análise Petrográfica 28

IV.3 Ferro-carbonatitos 35

IV.4 Cálcio-carbonatitos 36

IV.5 Fenitos 36

V. QUÍMICA MINERAL 43

V.1 Introdução 43

V1.1 Condições Analíticas 43

V1.2 Estimativa de Erros 45

V.2 Sinopse da Análise de Química Mineral 47

V.3 Óxidos 48

V.3.1 Pirocloro 48

V.3.2 Cerianite 50

V.4 Fosfatos 51

V.4.1 Apatite 51

V.4.2 Minerais do Grupo da Rabdofanite 52

V.5 Flúor-carbonatos 54

VI. CARACTERIZAÇÃO LITOGEOQUÍMICA 59

VI.1 Introdução 59

VI.2 Caracterização Geoquímica do Complexo Carbonatítico de Bailundo 62

VI.2.1 Elementos Maiores 62

VI.2.2 Elementos Incompatíveis 66
VII. DISCUSSÃO 79
VIII. CONCLUSÕES 119
IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 125
ANEXOS

AGRADECIMENTOS

Antes de prosseguir com a exposição do presente trabalho expresso o meu sincero agradecimento a todos aqueles que tornaram possível a realização desta tese contribuindo com o seu conhecimento e amizade. Em primeiro lugar, um agradecimento à Genius Mineira Lda. pela oportunidade dada e financiamento e um sincero agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor António Manuel Nunes Mateus por mais uma vez ter dado a oportunidade de desenvolver trabalho de investigação num tema de meu interesse, por todo o apoio prestado e conhecimento atribuído; ao Professor Doutor Jorge Manuel Verdilhão Figueiras, pelo esclarecimento de dúvidas na área da mineralogia e acompanhamento nas sessões de microssonda electrónica; ao colega Pedro Santos, que comigo trabalhou no projecto Angola; à colega e amiga Ana Jesus pelo esclarecimento de dúvidas; à colega e amiga Flávia Maia pela ajuda e paciência nas formatações; ao técnico superior da microssonda electrónica Pedro Celestino dos Reis Rodrigues pelo empenho e realização das análises de microssonda; ao Sr. Alberto Verde na realização das lâminas delgadas polidas; aos colegas que no departamento partilharam comigo esta etapa contribuindo com o seu apoio pessoal e profissional; a todos os meus amigos que comigo partilharam as angústias e felicidades desenvolvidas nesta etapa da minha vida e finalmente à minha família, que também contribuiu para o financiamento desta pós-graduação; um obrigada especial para meu avô a quem dedico esta tese.

RESUMO

Os complexos alcalino-carbonatíticos correspondem a produtos de magmas mantélicos gerados e instalados durante os eventos de reactivação tectono-magmática (*rifting* intracontinental) de terrenos antigos, predominantemente de idade Arcaica ou Proterozóica. As rochas carbonatíticas são rochas ígneas ricas com mais de 50% em volume de minerais carbonatados magmáticos, contendo menos de 10% de sílica.

No território de Angola conhecem-se 45 complexos alcalino-carbonatíticos, os quais correspondem a estruturas (sub)intrusivas com morfologia (sub)circular que se distribuem ao longo de dois alinhamentos tectónicos intra-continentais activos desde o Cretácico Inferior (138-130 Ma). O Complexo Carbonatítico de Bailundo (CCB) situa-se a 11 km a NE da localidade de Bailundo e a cerca de 100 km a NNE da cidade de Huambo, numa região denominada Mungo. Apresenta uma morfologia típica de estrutura anelar com ≈ 7 km de diâmetro e ≈ 38.5 km^2 de área. Desenvolve-se na *Província Alcalino-Carbonatítica Diagonal Trans-angolana*, definida ao longo de um alinhamento SW-NE desde o litoral até à fronteira com a República Democrática do Congo. O CCB compreende um domínio central, correspondendo ao Morro Belém (atingindo 1805 m de altitude), constituído por rochas carbonatíticas (*ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos*) e um *anel externo de fenitização*.

O tema desta tese tem como objectivo primordial o estudo dos Elementos de Terras Raras (ETR), nomeadamente: (i) sua abundância relativa; (ii) caracterização e distribuição espacial; (iii) fases minerais que as incorporam e seu modo de ocorrência e (iv) avaliação do potencial económico. Um último objectivo prende-se com a avaliação das características petrogenéticas do CCB, com base na análise dos ETR e elementos traço. Os ETR, também designados por lantanídeos, compreendem os 15 metais do grupo IIIA da Tabela Periódica com número atómico 57 ao 71; a estes associam-se ítrio (Y), escândio (Sc) e tório (Th). As suas aplicações em diversas soluções tecnológicas, levam ao contínuo aumento da procura. Neste contexto, o estudo dos complexos carbonatíticos é muito importante, pois contêm frequentemente, para além de outros elementos, concentrações anómalas em ETR.

Em termos gerais, os *fenitos* e *carbonatitos* examinados revelam textura e natureza composicional relativamente heterogénea que reflecte a sobreposição de transformações desencadeadas por processos tardi-magmáticos e hidrotermais subsequentemente intensificados pela meteorização química. Estes processos revelam-se cruciais ao desenvolvimento de associações minerais singulares; tal é o caso dos minerais portadores de ETR como flúor-carbonatos (parisite), fosfatos (rabdofanite e apatite) e óxidos (pirocloro e cerianite). Estas fases minerais, em conjunto com outras descritas em trabalhos anteriores (e.g. Santos, 2010), portadoras de metais de interesse, tornam o CCB um complexo polimetálico Fe-Nb-ETR (Ba) com potencial económico significativo.

A avaliação do potencial económico em [ETR+Y+Sc] (= REO*) revela conteúdos medianos elementares mais elevados para os *ferro-carbonatitos* com 0.81 wt% ($\bar{x}$ = 1.26 wt%), seguido dos *cálcio-carbonatitos* com 0.64 wt% ($\bar{x}$ = 1.16 wt%) e *fenitos* com 0.33 wt% ($\bar{x}$ = 0.75 wt%); as anomalias em ETR desenvolvem-se nomeadamente sector central e SW dos *ferro-carbonatitos* e nas faixas de transição para os *cálcio-carbonatitos*. Os minerais do grupo do pirocloro (pirocloro e Ba-pirocloro) ocorrem em todas as litologias, excepto o Ba-pirocloro que apenas se encontra nas rochas carbonatíticas; apresentam-se sob a forma de cristais euédricos de granularidade grosseira, disseminados pela matriz e apresentando

quantidades traço em ETR (≤ 7.78 wt%), mas elevados conteúdos em Nb (67.57 wt% - *ferro-carbonatitos*; 69.57 wt% - *cálcio-carbonatitos*; 64.95 wt% - *fenitos*) e Ba (19.16 - *ferro-carbonatitos* e 14.1 wt% - *cálcio-carbonatitos*). A cerianite ocorre nos *ferro-carbonatitos* sob a forma de grãos de dimensão muito reduzida disseminados pela matriz e com conteúdos em ETR de 64.4 wt% (essencialmente Ce com 56.3 wt%); os minerais do grupo da rabdofanite [brockite, rabdofanite-(Ce), rabdofanite-(Nd)] são encontrados nos exemplares dos *ferro-carbonatitos* e formam disseminações matriciais tardias, bem como preenchimentos de redes anastomosadas de veios, filonetes e venulações, apresentando conteúdos em ETR_2O_3 variáveis entre 21.2 e 61.2 wt%; a parisite presente nos *cálcio-carbonatitos* ocorre em agregados de grão fino e morfologia radial e fibrosa, disseminados na matriz e desenvolvendo intercrescimentos com outros flúor-carbonatos (e.g. bastnäsite, synchysite) cuja identificação fidedigna não foi possível; apresenta conteúdos medianos em ETR_2O_3 de 44.8 wt%. A apatite, assim como o pirocloro, apresenta conteúdos traço em ETR (≤ 1.13 wt%) e ocorre em exemplares dos *cálcio-carbonatitos* e *fenitos* em secções prismáticas e basais, constituindo por vezes agregados monominerálicos. São observadas três tipologias de mineralização: (i) mineralizações primárias tipificadas pela fase pirocloro, (ii) magmático-hidrotermais tipificadas pelo desenvolvimento de Ba-pirocloro, parisite e apatite e (iii) supergénicas (hidrotermais?) tipificadas pelo desenvolvimento de cerianite e rabdofanite.

Os padrões de concentração em ETR e multi-elementares normalizados relativamente ao condrito e manto primitivo, respectivamente, afiguram-se compatíveis com a distribuição e abundância das fases minerais portadoras em ETR. Mostram elevados conteúdos em ETR tipificados por forte enriquecimento em ETRL relativamente a ETRP, onde o La e o Ce constituem os ETRL mais abundantes. De salientar os enriquecimentos em BaO e SrO; os empobrecimentos bem marcados em Rb, K, Zr-Hf e Ti e a fraccionação Nb/Ta (em média 14016 e 3521.97 para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos*, respectivamente) e Zr/Hf (em média 36.97 e 59.02 para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos*, respectivamente), com valores superiores ao manto primitivo (Nb/Ta = 17 e Zr/Hf = 36; Sun & McDonough, 1989), congruentes com o metassomatismo carbonatítico. Sublinha-se a elevada fraccionação Nb/Ta atribuída à fraccionação do pirocloro.

O exame comparativo da assinatura petrogenética do CCB com as informações publicadas para os complexos carbonatíticos de Angola e Brasil torna-se importante, na medida em que permite caracterizar a província carbonatítica de Angola e definir (potencialmente) guias para a prospecção e pesquisa mineral. A análise realizada confirma a potencialidade de Bailundo em ETR relativamente a alguns complexos carbonatíticos angolanos (Sulima-Monte Verde, Logonjo, Tchivira-Bonga e Lupongola) e brasileiros (Juquiá e Jacupiranga). Virulundo (complexo carbonatíticos angolano) e Itapirapuã, Angico dos Dias e Araxá (complexos carbonatíticos brasileiros) mostraram conteúdos em ETR próximos e, por vezes, superiores (e.g. Araxá e Virulundo) aos obtidos para Bailundo. A distribuição de concentração em ETR normalizados relativamente ao condrito para os complexos angolanos e brasileiros revela, tal como para Bailundo, forte enriquecimento em ETR, nomeadamente ETRL. Os padrões de concentração em elementos incompatíveis revelam assinaturas geoquímicas semelhantes às obtidas para Bailundo, destancando-se diferenças nos valores de BaO e SrO, mais elevadas para Bailundo que nos restantes complexos (angolanos e brasileiros), com excepção de Araxá que apresenta valores de SrO mais elevados. A elevada fraccionação Nb/Ta apenas

se observa para os carbonatitos angolanos, incluindo Bailundo (excepto Tchivira-Bonga), e para o carbonatito brasileiro de Araxá.

Palavras-chave: carbonatito, Bailundo, ETR, geoquímica, potencial económico.

ABSTRACT

Alkaline-carbonatitic complexes are mantle products mostly emplaced during the tectono-magmatic reactivation (intra-continental rifting) Archean or Proterozoic ancient terrains. Carbonatites are igneous rocks containing more than 50% volume of carbonate minerals (magmatic) with less than 1% of silica.

Currently, 45 alkaline carbonatitic complexes are known in Angola, comprising (sub)intrusive and (sub)circular bodies along two intra-continental tectonic lineaments active since the Early Cretaceous (138-130 Ma). The Bailundo Carbonatitic Complex (CCB) is located 11 km NE of Bailundo village and about 100 km NNE from Huambo city, Mungo region. This complex has an aneliforme morphology with approximately 7 km in diameter and 38.5 km^2 of area. It occurs at the Diagonal Transangolan Belt with a SW-NE trend, which extends from the coast to the Democratic Republic of Congo. The CCB comprises ferro-carbonatites and calcio-carbonatites, forming a central core (Morro Belém with 1805 m height) surrounded by a fenite peripheral ring.

The thesis aims the discussing of REE: (i) abundance; (ii) characterization and spatial distribution; (iii) mineral phases and occurrence and (iv) evaluation of economic potencial. An ultimate goal concerns the evaluation of the petrogenetic signatures of the CCB, through the examination of REE and trace elements behaviour. The REE are the 15 lanthanides elements with atomic numbers 57 through 71 in Group IIIA of the Periodic Table; commonly included in the REE group are yttrium (Y), scandium (Sc) and thorium (Th). The REE elements have high-technology applications, providing the growth of demand. So, the study of carbonatitic complexes is extremely important because potentially contain higher contents of these metals.

The petrographic study show the presence of fenites and carbonatites with heterogeneous texture and composition due to the overlapping of features triggered by late-magmatic and hydrothermal processes subsequently disturbed, to varying degrees, by chemical weathering. These processes are crucial to the development of typical mineral assemblages: fluorcarbonates (parysite), phosphates (rhabdophane and apatite) and oxides (pyrochlore and cerianite). These minerals, together with other mineral phases with economic interest already described in previous work (e.g. Santos, 2010), reflect a significant economic potential of CCB concerning poli-metallic Fe-Nb-REE (Ba) association.

The REO median contents for ferrocarbonatites (0.81 wt%; $\bar{x}$ = 1.26 wt%) are higher than calciocarbonatites (0.64 wt%; $\bar{x}$ = 1.16 wt%) and fenites (0.33 wt%; $\bar{x}$ = 0.75 wt%); domains with high economic potential correspond to ferrocarbonatites (central and SW sector) and their transition to calciocarbonatites. Pyrochlore minerals (pyrochlore and bariopyrochlore) are found in all rock types, except bariopyrochlore only recognized in carbonatitic rocks; the mineral occur as pervasive euhedric coarse grains with REE trace amounts (≤ 7.78 wt%), but high Nb (67.57 wt% - ferrocarbonatites; 69.57 wt% - calciocarbonatites; 64.95 wt% - fenites) and Ba contents (19.16 - ferrocarbonatites and 14.1 wt% - calciocarbonatites). Cerianite occur in ferrocarbonatites as very small pervasive grains with 64.4 wt% of REE (mainly 56.3 wt% of Ce); the rhabdophane group minerals [brockite, rhabdophane-(Ce), rhabdophane-(Nd)] are observed in ferrocarbonatitic rocks as late stage infillings of anastomosed, veins, veinlets and fractures, with REE contents between 21.2 e 61.2 wt%; parasite occur as fine-grained, radial and fibrous morphology in calciocarbonatites, intergrown with another fluorcarbonates not identified (e.g. bastnäsite, synchysite); the REE median contents are 44.8 wt%. Apatite, as well as pyrochlore, have trace amounts of REE (≤ 1.13 wt%)

and occur in calciocarbonatites and fenites. It occur as prismatic and basal crystals, sometimes forming mono-mineralic concentrations. There are three mineralization types: (i) primary mineralization represented by pyrochore, (ii) magmatic-hydrothermal represented by bariopyrochlore, parasite and apatite and (iii) supergene (hydrothermal?) represented by cerianite and rhabdophane.

Chondrite and primitive mantle normalized distribution patterns validate the abundance and distribution of REE mineral phases. They show high REE contents typified by LREE enrichment relative to HREE, where La and Ce are the most abundant. Noted BaO and SrO enrichments; depletions in Rb, K, Zr-Hf and Ti and the fractionation of Nb/Ta (average 14016 and 3521.97 for ferrocarbonatites and calciocarbonatites, respectively) and Zr/Hf (average 36.97 and 59.02 for ferrocarbonatites and calciocarbonatites, respectively), higher than primitive mantle values (Nb/Ta = 17 and Zr/Hf = 36; Sun & McDonough, 1989), assigned to metassomatic carbonatitic melts. Noted that the high Nb/Ta ratio is also assigned to the fractionation of pyrochlore.

Comparing the petrogenetic signatures between CCB, Angola and Brazil carbonatitic complexes allows characterize the Angola carbonatitic province and provide useful guides to mineral prospecting and exploration. The results confirm the high REE potential of Bailundo relative to some angolan carbonatitic complexes (Sulima-Monte Verde, Logonjo, Tchivira-Bonga and Lupongola) and brazilians (Juquiá and Jacupiranga). Virulundo (angolan carbonatitic complex) and Itapirapuã, Angico dos Dias e Araxá (brazilian carbonatitic complexes) show similar REE contents and, sometimes, higher (e.g. Araxá and Virulundo) than Bailundo. The chondrite normalized REE distribution patterns for angolan and brazilian complexes reveals, as for Bailundo, strong enrichment, namely in LREE. The primitive mantle nomalized multi-elemental patterns show geochemical signatures similar to Bailundo, highlighting the differences in BaO and SrO values, higher in Bailundo, except for Araxá with higher contents in SrO. De hight Nb/Ta fraccionation is only observed in angolan carbonatites, inclusive Bailundo (except Tchivira-Bonga), and for brazilian carbonatite complex of Araxá.

Keywords: carbonatite, Bailundo, REE, geochemistry, economic importance.

“And what is the origin of that most perplexing of magmas, the carbonatite magma…?”

Turner and Verhoogen, 1960

CAPÍTULO I
INTRODUÇÃO

No âmbito do protocolo de cooperação técnico-científica entre a Genius Mineira Lda. e a Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (através do seu Centro de Geologia), assinado a 27 de Maio de 2009, foi estabelecida uma equipa de trabalho que, integrando profissionais no activo e licenciados em geologia, foi responsável por responder às questões emergentes relacionadas com as actividades de prospecção e pesquisa em curso na área de Mungo (Angola).

Os objectivos da concessão Mungo visam a caracterização mineralógica e geoquímica das litologias enquadrantes dos domínios mineralizados reconhecidos pela Genius Mineira Lda. no Complexo Carbonatítico de Bailundo (CCB), dando especial atenção às fases portadoras de metais de interesse. O CCB, de forma anelar com ≈ 7 km de diâmetro e ≈ 38.5 km^2 de área, desenvolve-se na *Província Alcalino-Carbonatítica Diagonal Trans-angolana* e compreende um *núcleo ferro-carbonatítico*, um *anel cálcio-carbonatítico* e um *anel externo de fenitização*.

O tema desta tese constitui parte do amplo plano de trabalho realizado, visando o estudo do CCB e procurando contribuir para o seu estudo metalogénico, tendo como objectivo o estudo dos Elementos de Terras Raras (ETR), nomeadamente: (i) sua abundância relativa; (ii) caracterização e distribuição espacial; (iii) fases minerais que as incorporam e seu modo de ocorrência e (iv) avaliação do potencial económico. Um último objectivo prende-se com a avaliação das características petrogenéticas do CCB, com base na análise dos ETR e elementos traço.

Os ETR, também designados por lantanídeos, compreendem os 15 metais do grupo IIIA da Tabela Periódica com número atómico 57 ao 71, para além dos elementos ítrio (Y), escândio (Sc) e

tório (Th). As suas aplicações em diversas soluções tecnológicas, nomeadamente no âmbito das tecnologias limpas de elevado desempenho e eficiência energética, levam ao contínuo aumento da procura junto dos países produtores. Outrora os EUA com a exploração de Mountain Pass, desactivada em 2006, foram o principal produtor mundial de ETR, posição actualmente ocupada pela China que, contudo, enfrenta dois grandes desafios: (i) abastecimento do seu mercado interno (em crescimento exponencial) e (ii) alteração significativa de práticas mineiras em regiões com elevada vulnerabilidade. Importa assim, encontrar novos depósitos que permitam suprir as necessidades que se projectam para o futuro a curto e médio prazo, nomeadamente as que se relacionam com a tecnologia dos super-magnetes. Estas necessidades crescentes justificam o ritmo elevado na progressão das actividades de prospecção em várias regiões, nomeadamente em Nolans (Austrália), Hoidas Lake e Thor Lake (Canada), e Kangankinde (Malawi), registando-se o início da exploração em Mt. Weld (Austrália) durante o final do 1º semestre de 2008 (Hedrick, 2009). Neste contexto, aumenta o interesse generalizado na avaliação dos complexos carbonatíticos enquanto recurso potencial de ETR.

Os 45 complexos alcalino-carbonatíticos, até ao momento reconhecidos no território angolano, apresentam composição relativamente heterogénea e, de acordo com os escassos dados disponíveis, algumas das suas unidades manifestam conteúdos em ETR que justificam o desenvolvimento de estudos mineralógicos e geoquímicos adicionais. Encontra-se nesta situação o CCB (Mungo), justificando-se deste modo o seu estudo.

Para atingir os objectivos enunciados foi efectuada:

(1) síntese da informação relevante sobre ETR, nomeadamente quanto: (i) às suas características estruturais e de que forma as mesmas condicionam o comportamento geoquímico e consequente distribuição nos diferentes sistemas naturais; (ii) às fases minerais portadoras de ETR, considerando a sua composição química e estabilidade relativa (incluindo os produtos usuais de alteração e neo-formação em diferentes condições físico-químicas, com especial destaque para os processos de fenitização e meteorização); (iii) aos principais tipos de depósitos de ETR e, neste contexto, a importância relativa dos complexos carbonatíticos; e (iv) à economia dos ETR, tomando como referência os balanços entre a oferta (produção) e a procura (consumo) nas duas últimas décadas e as projecções futuras;

(2) análise das distribuições de concentração em ETR para o CCB, tomando como referência os dados de litogeoquímica disponibilizados pela Genius Mineira Lda.. Desta análise emergiram critérios úteis à prospecção e pesquisa mineral, bem como à delimitação das unidades constituintes do CCB com maior potencialidade económica, recorrendo, para o efeito, ao exame cuidado das características litogeoquímicas (multi-elementares);

(3) caracterização das fases minerais portadoras de ETR, examinando ainda o seu modo de ocorrência e condições de formação. Daqui resultaram informações úteis quanto aos procedimentos a usar no eventual tratamento/beneficiação de minérios;

(4) análise multi-elementar dos elementos incompatíveis (ETR e elementos traço) procurando reconhecer a assinatura petrogenética do CCB e consequente exame comparativo com a informação disponível para os carbonatitos Angolanos e Brasileiros.

CAPÍTULO II
MINERAIS DO GRUPO DAS TERRAS RARAS

II.1 Introdução

Os elementos do Grupo das Terras Raras (ETR), também designados por lantanídeos, segundo a IUPAC (*International Union Pure and Applied Chemistry* – União Internacional de Química Pura e Aplicada), compreendem os 15 metais do grupo IIIA da Tabela Periódica com número atómico 57 ao 71: lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), samário (Sm), európio (Eu), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb) e lutécio (Lu) (**Figura 1**). O termo foi proposto por Johann Gadolin em 1794 (Christie *et al*., 1998): "terras" provém do aspecto terroso dos seus óxidos insolúveis, e "raras" por terem sido erradamente consideradas pouco abundantes na natureza pelos químicos que iniciaram o seu estudo no final do século XVIII. São na verdade relativamente comuns, mas muito dispersas (e.g. Lapido Loureiro, 1994). Para além dos 15 lantanídeos, são também incluídos os elementos escândio (Sc), ítrio (Y) e tório (Th) por apresentarem forte afinidade geoquímica com os ETR devido à similaridade do raio iónico; o Sc e Y apresentam propriedades químicas semelhantes ao subgrupo Sm–Ho e Er–Lu, respectivamente (e.g. Rollinson, 1993; Lapido Loureiro, 1994).

As propriedades químicas e físicas dos ETR são similares, uma vez que apresentam todos estado de valência 3+; com excepção do Eu e Ce podendo apresentar estados de valência 2+ e 4+, respectivamente. As diferenças no comportamento destes elementos devem-se à diminuição do raio iónico, pequena mas contínua, com o aumento do número atómico. Dividem-se as ETR em três subgrupos: (i) subgrupo dos Elementos de Terras Raras Leves (ETRL) correspondendo aos membros da série com baixo número atómico (La–Sm); (ii) subgrupo dos Elementos de Terras

Raras Pesados (ETRP) com número atómico elevado (Ho–Lu + Y) e (iii) e de utilização menos comum, os Elementos de Terras Raras Intermédios (ETRI) (Eu – Dy). Em geoquímica, é ainda comum dividir em três subgrupos: subgrupo do lantânio (La–Nd), subgrupo do ítrio (Sm–Ho) e subgrupo do escândio (Er–Lu).

A abundância crustal das ETR varia de elemento para elemento, sendo os ETRL mais abundantes que os ETRP (Neary *et al.* 1984). O Ce é o 25º elemento mais abundante de entre os 78 elementos comuns na crusta terrestre, em 60 ppm. Seguido do Ce, temos por ordem decrescente o Y (2º mais abundante na crusta), La e Nd com 33 ppm, 30 ppm e 28 ppm, respectivamente; o Tm e Lu são os menos abundantes com cerca de 0.5 ppm (Hedrick, 2007 *in* Mason and Moore, 1982; Hedrick e referências citadas, 2007), exibindo ainda assim maiores concentrações que o Sb, Bi, Cd e Tl. O Sc é o mais leve e o 31º mais abundante elemento da crusta terrestre, com uma abundância média crustal de 2 ppm (Hedrick e referências citadas, 2007).

Neste capítulo abordar-se-ão, em primeiro lugar, as características mineralógicas dos minerais de ETR, seguido das suas propriedades e aplicações, tipos de depósitos minerais e sua distribuição no mundo, finalizando com as reservas mundiais e sua situação económica actual.

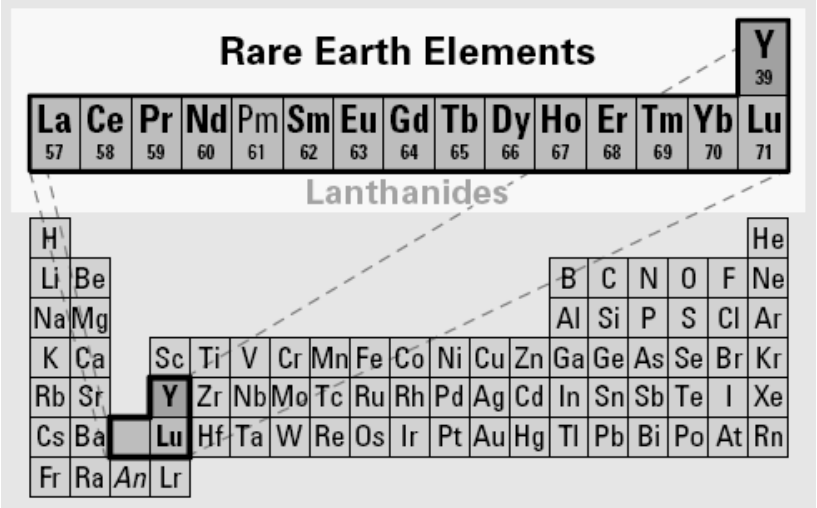


Figura 1. Tabela periódica ilustrando os ETR incluindo o Y (*in* Haxel *et al.*, 2002).

II.2 Minério e Minerais

Os ETR ocorrem em muitas espécies minerais, contudo poucas são aquelas que apresentam concentrações suficientes de modo a constituir depósitos minerais com interesse económico (Neary *et al.* 1984). São frequentemente elementos acessórios dos minerais sob duas formas: (i) inclusões formadas durante o crescimento do mineral principal, ou nas fendas e superfícies, constituindo fases acessórias introduzidos após formação do mineral original e (ii) elementos acompanhantes, introduzidos no mineral principal por isomorfismo (Lapido Loureiro, 1994). Podem ser agrupados, tendo em conta os conteúdos em ETR e Y, em três conjuntos: (i)

minerais comuns nas rochas, contendo baixas concentrações em ETR; (ii) minerais cujos ETR e Y são constituintes essenciais mas que podem atingir valores superiores a 0.01 wt% e (iii) minerais em que os ETR ou o Y são essenciais.

Alguns exemplos de minerais importantes pelo seu conteúdo em ETR encontram-se listados na **Tabela 1**, onde figura uma possível classificação, convencionalmente com base nos grupos aniónicos em halogenetos, carbonatos, boratos, óxidos, fosfatos e silicatos e respectiva fórmula química. São conhecidas até ao momento cerca de 200 espécies minerais de ETR e, para cerca de metade, estão descritas as estruturas cristalinas (Burt, 1989; Kanazawa *et al.*, 2006). Os principais minerais de ETR são a bastnäsite [$(Ce,La)CO_3F$], monazite [$(Ce,La,Nd,Th,Y)PO_4$] e xenótimo (YPO_4), constituindo os seus concentrados a principal fonte (mais de 95%) da produção mundial de ETR. A bastnäsite pode conter 60-70% de óxidos de ETR e até 0.1% de Y_2O_3; a monazite 55-60% de óxidos de ETR e até 2% de Y_2O_3, sendo também a principal fonte de Th, contendo mais de 30% deste elemento; o xenótimo é uma fonte de ETRP e Y, podendo incorporar 61.5% deste último elemento (Lapido Loureiro, 1994).

Tabela 1. Classificação dos Minerais de ETR (adaptado de Kanazawa *et al.*, 2006).

Classe Mineral	Exemplos de minerais e fórmula química
Fluoretos	Fluocerite-(F), CeF_3
Carbonatos	
Com flúor	Bastnäsite, $(Ce,La)CO_3F$
Sem flúor	Ancylite, $(Ce,Sr,Ca)(CO_3)(OH,H_2O)$
Óxidos e Hidratos	
Tipo AO_2	Cerianite, $(Ce^{4+},Th^{4+})O_2$
Tipo ABO_3	Grupo da Perovskite, $(Ca,Ce,Na,Sr)(Ti,Nb,Ta)O_3$
Tipo ABO_4	Fergusonite-Formanite, $Y(Nb,Ta)O_4$-$Y(Ta,Nb)O_4$
Tipo $AB_2(O,OH)_6$	Grupo da Euxenite, $(Y,Ca,Ce,U,Th)(Nb,Ta,Ti)_2O_4$
Tipo $A_2B_2O_6(O,OH,F)$	Grupo do Pirocloro, $(Na,ETR,K,U)_2(Nb,Ta,Ti)_2(O,OH,F)$
Outros	Hibonite, $(Ca,Ce)(Al,Ti,Mg)_{12}O_{19}$
Fosfatos, arsenatos e vanadatos	
	Apatite, $(Ca,ETR,Sr,Na,K)_3Ca_2(PO_4)_3(F,OH)$
	Monazite, $(Ce,La)PO_4$
	Xenótimo, YPO_4
Silicatos	
Ortossilicatos	Cerite, $(Ce,La,Ca)_9(Fe^{3+},Mg)(SiO_4)_6[SiO_3(OH)](OH)$
	Granada, $(Ca,Fe,Mg,Mn,Y)_3(Al,Cr,Fe,Mn,Ti,V,Zr)_2(Si,Al)_3O_{12}$
	Esfena, $CaTiSiO_4$
Sorossilicatos	Alanite, $Ca(Ce,Y,Ca)Al(Al,Fe)(Fe,Al)(SiO_4)_3(OH)$
Inossilicatos	Stilwelite, $CeBSiO_5$
Ciclossilicatos	Eudialite, $(Na,Ca,Ce)_6(Zr,Fe)_2Si_7(O,OH,Cl)_{22}$
Filossilicatos	Gadolinite, $(Y,Ce)_2Fe^{2+}Be_2Si_2O_{10}$
Tectossilicatos	Kainosite, $Ca_2(Y,ETR)_2(Si_4O_{12})CO_3{\cdot}H_2O$
Outros	Limoriite, $Y_2(SiO_4)(CO_3)$

II.3 Propriedades e Aplicações

A versatilidade e especificidade dos ETR explicam a sua importância a nível tecnológico, ambiental e económico (Haxel *et al.*, 2002). Em 1885, tem início a indústria dos ETR, com a sua utilização nas camisas dos bicos de iluminação a gás, invenção de Carl Auer von Welsbach. Em 1993, começaram a ser usadas na indústria do vidro, primeiro no polimento, depois como agente descolorante e colorante. Actualmente, são utilizadas em centenas de aplicações: sob a forma de *mischmetal* (liga de ferro e ETR obtida a partir do minério bruto) ou de *mischmetal* sem Ce; óxidos, hidróxidos, carbonatos, fluoretos (em pó) ou cloretos (de 95% a 99.999%) e didímio (liga de Nd-Pr em proporções variáveis) (Lapido Loureiro, 1995).

Os metais de ETR, normalmente, apresentam brilho e condutividade eléctrica elevada e, quimicamente, são agentes fortemente redutores. O Eu, seguido do Ce, constituem os ETR mais reactivos; estes tendem a formar rapidamente óxidos de ETR em contacto com o ar. A elevadas temperaturas, muitos inflamam e queimam energicamente; por exemplo o Eu inflama no ar a cerca de 150 a 180ºC. A maior parte dos componentes de ETR são paramagnéticos, sendo o Ho uma das substâncias mais paramagnéticas conhecidas. Outros componentes, particularmente os de Eu, Pr e Nd, são fortemente fluorescentes sob luz ultravioleta. Alguns são radioactivos como o Pm e o Th. O *mischmetal* é pirofórico (Christie *et al*., 1998).

Enumera-se agora uma síntese dos campos de aplicação (Preinfalk e Morteani (1989) *in* Lapido Loureiro, 1994):

(a) Metalurgia: aços especiais de alta resistência [HSLA (*High Strength Low Alloy*), *Ferralloy* (15 – 20% Cr; 4 – 5% Al; 0.5 – 4% de óxido de Y)], aços anti-corrosão a altas temperaturas (ligas de Ni-Cr-Al-Y e Co-Cr-Al-Y), produtos pirofóricos (“pedras de isqueiro”).

(b) Catálise: craqueamento do Petróleo, escapamento de veículos (antipoluentes).

(c) Cerâmicas: coloração, estabilização das cerâmicas de alta temperatura (Y), super-condutividade (cerâmicas de Y ou La).

(d) Vidro: polimento e estabilização (CeO_2), vidros especiais (absorventes, de contraste, fotocromáticos), fibras ópticas (fluoretos de La ou Gd), descoloração (Ce, Nd, Er), coloração (Nd –roxo, Pr – verde claro, Er – rosado), revestimento, fluorescência.

(e) Magnetos permanentes de alta intensidade (Sm-Co-Nd-B-Fe).

(f) Fósforos (emissões de comprimento de onda específicos): telas de raios-X, lâmpadas fosforescentes, granadas sintéticas YAG (*yttrium aluminium garnet*).

(g) Energia nuclear.

(h) Hidretos metálicos.

(i) Sensores de oxigénio.

(j) Sistemas de células de memória.

Outras aplicações: joalharia, medicina, sistemas de energia solar, microondas, *lasers* químicos, refrigeradores, feixes microscópicos, fertilizantes/nutrientes agrícolas, têxteis (Lapido Loureiro, 1994; Lapido Loureiro 1995). No Anexo 1, Tabela 1, ilustram-se alguns exemplos das aplicações dos ETR.

Muitas aplicações dos ETR são de elevada especificidade e valor único. Por exemplo, cristais-líquidos usados nos monitores dos computadores e televisores empregam Eu; nenhum substituto é conhecido. A fibra-óptica fornece maior banda larga que os fios e cabos de cobre; consegue transmitir ao longo de longas distâncias pois incorpora comprimentos periodicamente espaçados de Er que funcionam como amplificadores laser; só o Er, apesar dos elevados custos (aproximadamente $700/kg), é o único que detém as propriedades ópticas necessárias. O Ce, o mais abundante e menos dispendioso ETR, tem dezenas de aplicações, algumas de elevada especificidade. Por exemplo, o óxido de Ce é único como agente de polimento para vidros e lentes especiais. As propriedades físico-químicas e o estado de oxidação, em soluções aquosas, do óxido de Ce influenciam na acção de polimento. Aplicações ambientais dos ETR têm crescido ao longo das últimas três décadas e esta tendência irá continuar, em resultado das crescentes preocupações acerca do aquecimento global e energia eficiente. Vejamos, são usados na indústria do petróleo como catalisadores; contribuem para a redução das emissões de CO_2 através, por exemplo, da adopção de novas lâmpadas fluorescentes de eficiência energética (usando Y, La, Ce, Eu, Gd, e Tb) que equivale a remover 1/3 dos automóveis nos EUA. A aplicação de tecnologia de refrigeração magnética também pode reduzir significativamente o consumo de energia e emissões de CO_2. Em muitas aplicações os ETR são vantajosos pela sua baixa toxicidade. Por exemplo, as baterias recarregáveis de lantânio-níquel-hidreto (La-Ni-H) estão gradualmente a substituir as baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) nos computadores. Embora mais dispendiosas, as baterias de La-Ni-H oferecem maior densidade de energia, melhores características de carga-descarga e menos problemas ambientais na eliminação e reciclagem. Outro exemplo, os pigmentos vermelhos, vermelho-laranja feitos de La ou Ce substituem o comércio dos tradicionais pigmentos à base de Cd ou outros metais tóxicos. Outra grande aplicação tecnológica é o uso dos refrigerantes magnéticos; os ETR do Gd^{3+} ao Tm^{3+} possuem tais propriedades. A refrigeração magnética é mais eficiente que a refrigeração por compressão a gás e não requer refrigerantes tóxicos ou inflamáveis (alguns dos quais concorrem para a destruição da camada de ozono e outros contribuem para o aquecimento global, por força do efeito de estufa). Esta nova tecnologia pode ser empregue, por exemplo, em frigoríficos e ar condicionados (Haxel *et al*., 2002). Assinalam-se ainda a aplicação de

ETR na construção de componentes vitais dos motores automóveis, híbridos e dos aerogeradores de última geração.

Todas estas aplicações explicitam de forma clara a importância dos ETR na sociedade onde vivemos.

II.4 Tipos de Depósitos

Os minerais e depósitos de ETR ocorrem em ambientes geológicos variados. Uma proposta de classificação para os maiores depósitos encontra-se na **Tabela 2**, onde são divididos geneticamente em ígneos, sedimentares, e de enriquecimento residual (Kanazawa *et al*., 2006).

Tabela 2. Classificação dos depósitos minerais de ETR (adaptado de Kanazawa *et al*., 2006)

Tipo de Depósito	Principais exemplos
(1) Ígneos	
Hidrotermal	Bayan Obo (China)
Carbonatitos	Mt. Pass (USA), Weshan, Maoniuping (China), Mount Weld (Austrália), Araxá, Catalão (Brasil)
Rochas alcalinas	Khibina, Lovozero (Rússia), Poço de Caldas (Brasil)
Granitos alcalinos	Strange Lake (Canadá)
(2) Sedimentar	
Placer	Kerala (India), Austrália Ocidental, Estado Queesland (Austrália), Richards Bay (África do Sul)
Conglomerado	Elliot Lake (Canadá)
(3) Enriquecimento residual e supergénico	
Alteração residual de granitos (argilas de adsorção iónica)	Longnan, Xunwu (China)

II.4.1 Ígneos

Hidrotermal

Bayan Obo, situado na Mongólia Interior (China) (**Figura 2**), foi descoberto em 1927 e é considerado o maior depósito de ETR (ETR-Nb-Fe) do Mundo (Christie *et al.*, 1998; Yang *et al*., 2003 e referências citadas), com conteúdos em ETR de 1 wt% a 20 wt% (em média 8 wt%; Yang *et al*., 2003). Os principais minérios de ETR são a bastnäsite e monazite, acompanhadas por variados minerais de ETR-Nb como a aeschinite, felgusonite e columbite; os minerais portadores encontram-se estritamente associados ao minério de ferro constituído por magnetite e hematite (Kanazawa *et al.*, 2006; Lee, 1970 *in* Lapido Loureiro, 1994). O depósito encontra-se hospedado em rochas carbonatadas (calcários dolomíticos) e são encontrados nas proximidades diques carbonatíticos, sendo que ambas as litologias são portadoras de mineralização. A ocorrência dos diques

carbonatíticos tem suscitado o debate acerca da origem da mineralização que ocorre nos calcários dolomíticos, e por conseguinte, sobre a génese do depósito, tendo sido propostos vários modelos para a sua origem: (1) directamente relacionada com o magmatismo carbonatítico; (2) resultante de alteração hidrotermal das rochas sedimentares carbonatadas; (3) interacção de fluidos carbonatíticos provenientes do manto ou da crusta inferior (Yang *et al*., 2000; Yang *et al*., 2009 e referências citadas). No trabalho de Yang *et al*. (2000) é proposto que a maioria da mineralização em ETR está provavelmente associada a fluidos hidrotermais, tendo Yang *et al*. (2003) sugerido uma origem carbonatítica para esses fluidos. Um trabalho recente de Yang *et al*. (2009) sugere que o depósito decorre do metassomatismo das rochas sedimentares carbonatadas por fluidos mantélicos, provavelmente derivados de um magma carbonatítico enriquecido em ETR. A diversidade de interpretações demonstra bem a complexidade deste depósito, incluindo a sua classificação (magmática *versus* hidrotermal?); alguns autores defendem a contribuição hidrotermal como factor determinante na origem da mineralização, classificando-o como tal num depósito hidrotermal, tal como é apresentado na **Tabela 2**, no entanto parece lícito classificá-lo como um depósito carbonatítico face à origem carbonatítica desses fluidos hidrotermais.

Complexos Alcalino-Carbonatíticos

Os complexos alcalino-carbonatíticos correspondem a produtos de magmas mantélicos gerados e instalados durante os eventos de reactivação tectono-magmática (*rifting* intra-continental) de terrenos antigos, predominantemente de idade Arcaica ou Proterozóica. As rochas carbonatíticas suas constituintes são definidas, de acordo com o sistema de classificação da IUGS (*International Union Geological Sciences*), como rochas ígneas ricas em minerais carbonatados primários (mais de 50% em volume), isto é, magmáticos, contendo menos de 10 wt% de sílica (Hoernle *et al*., 2002; Woolley *et al*., 1989). A primeira descrição foi feita por Bose (1884) em carbonatitos do Vale Inferior Narbada na Índia, tendo apenas sido proposta a origem magmática, pelos estudos efectuados em rochas carbonatadas em complexos alcalinos de Alnö (Suécia) e Fen (Noruega), pelos investigadores Högbohm (1895) e Brøgger (1921), respectivamente (Mitchell, 2005). Estes complexos encontram-se em todos os continentes (excepto na Antárctica), com idades desde o Arcaico até ao presente (ex. Bell, 1989 *in* Hoernle *et al*., 2002), sendo reconhecidos em ambiente oceânico apenas nas ilhas de Cabo Verde e Canárias (Hoernle *et al*., 2002). As fácies intrusivas dominam claramente sobre as extrusivas, representando estas últimas apenas aproximadamente 10% das ocorrências conhecidas em todo o mundo (Woolley and Church, 2005 *in* Mourão *et al.*, 2010).

Conhecem-se cerca de 350 complexos alcalino-carbonatíticos em todo o mundo (e.g. Bailey, 1993 *in* Lapido Loureiro, 1995) (**Figura 2**), associados a estruturas de rifte de grande escala ou regiões continentais marginais, em especial cratões e escudos Pré-câmbricos. Cerca de metade

localizam-se em África, na sua metade meridional (entre 5º N e o limie S), concentrados na maioria perto do Rifte Este Africano (Lapido Loureiro, 1995; Woolley, 1989; Kanazawa *et al.*, 2006). A outra grande maioria concentra-se no norte da península Escândinava-Kola, Canadá Oriental, e sul do Brasil. Associam-se geralmente a rochas ultramáficas e/ou alcalinas, ocorrendo em muitos casos na forma de diques, intrusões cilíndricas e cones vulcânicos (Kanazawa *et al*., 2006).

Apresentam características geoquímicas e mineralógicas particulares, traduzindo-se por concentrações anómalas em ETR, Ba, Sr, P, Fe, Ti, Zr, Nb, apatite, fluorite, flogopite, vermiculite e barite; por vezes, reconhecem-se também conteúdos apreciáveis em U, Ta, Zn, Pb, Cu, Th e Ni (Santos *et al.*, 2009a). Representam a maior reserva de Nb (Brasil, Canadá, Zaire, Gabão), ETR (China, EUA, Austrália, Brasil) e P (Rússia, Brasil, República da África do Sul, Finlândia) do mundo, constituindo ainda uma fonte de importância assinalável para Cu (República da África do Sul, Brasil), Ti (Brasil), F (Brasil, Índia), Ba (Brasil), Fe (Noruega, Brasil), V (Bolívia), Sr (Namíbia), vermiculite (República da África do Sul, Brasil) e carbonatos para a indústria cimenteira e correctivos agrícolas (Mariano, 1989; Santos *et al.*, 2009a). Os enriquecimentos anómalos em ETR são característica distintiva dos carbonatitos; com concentrações desde ≈ 500 a > 10 000 ppm (Mariano, 1989 e referências citadas), podem reflectir a presença de anomalias com significado económico. É neste contexto que surge o interesse no estudo do CCB, enquanto complexo carbonatítico potencial portador de ETR.

Mountain Pass, descoberto em 1949, situa-se entre a zona Sul da Califórnia e Nevada (EUA); foi outrora o maior depósito de ETR, posição actualmente ocupada por Bayan Obo (Christie *et al.*, 1998; Kanazawa *et al.*, 2006). O principal minério de ETR é a bastnäsite, que ocorre em carbonatitos intrusivos num complexo essencialmente granítico-gnáissico (Lapido Loureiro, 1994). Exemplos de outros depósitos carbonatíticos ricos em ETR são: Mount Weld (Austrália), Araxá e Tapira (Minas Gerais, Brasil), Tomtor (Norte da Sibéria), Fen District (Noruega), Karonge (República do Burundi) e Kangankunde Hill (Malawi) (Christie *et al.*, 1998).

Não parece existir dúvida quanto à origem mantélica dos carbonatitos, justificada pelo enriquecimento em Sr, Nb, Ba, ETRL, Pb, Th e U, típicos elementos mantélicos. Três interpretações para a sua génese são hoje discutidas: (i) magmas primários produzidos durante a fusão parcial baixa de um manto peridotítico com componente carbonatada; (ii) cristalização fraccionada extrema de um magma silicatado e carbonatado e (iii) imiscibilidade e cristalização fraccionada, permitindo a coexistência entre líquido silicatado e carbonatado (Mourão *et al.*, 2010 e referências citadas).

Podem ser subdivididos em carbonatitos primitivos e tardios. Os primeiros dizem respeito aos magmas carbonatíticos primários, gerados no inicio da actividade ígnea, que podem ser diferenciados por fenitização e cristalização fraccionada. Os carbonatitos característicos dos estádios iniciais são Na-carbonatitos, Ca-carbonatitos, e Mg-carbonatitos; os carbonatitos ricos em cálcio (sövito), são os mais comuns, podendo perfazer 75% ou mais do complexo carbonatítico. No

decurso da formação do carbonatito, os líquidos residuais contribuem para o metassomatismo da rocha encaixante (processo designado por fenitização), traduzindo-se pela alteração e/ou aparecimento de novas paragéneses minerais. Os carbonatitos tardios são produto de manifestações ígneas tardias, resultando carbonatitos enriquecidos em ferro, designados ferro-carbonatitos com o desenvolvimento de mineralizações que podem ser divididas em quatro estádios: (i) ETRs, (ii) fluorite, (iii) barite, e (iv) U-Th, geralmente acompanhadas por silicificação. As mineralizações de U-Th são normalmente disseminadas e raramente têm valor económico (Le Bas, 1989). O desenvolvimento de carbonatitos ricos em ETR ocorre tipicamente no último estádio magmático em complexos alcalino-carbonatíticos.

Rochas Alcalinas

As rochas ígneas peralcalinas são caracterizadas por excesso de álcalis (Na_2O + K_2O) relativamente ao alumínio, resultando na presença de anfíbolas e piroxenas sódicas, também presentes nos granitos alcalinos. Tipicamente, as fases peralcalinas correspondem aos eventos mais recentes relacionados com a formação do complexo intrusivo. Pode ocorrer uma variedade de fases minerais exóticas associadas a estas rochas, incluindo fases portadoras de ETR. Em depósitos magmáticos, os minerais portadores de ETR cristalizam com as rochas ígneas tipicamente de forma disseminada. A alteração hidrotermal associada aos depósitos é normalmente tardia, deutérica e local; depósitos metassomáticos ocorrem sob a forma de veios, *stockworks* e irregulares zonas de substituição, e estão relacionados com o arrefecimento e a libertação de fluidos das intrusões. O maciço alcalino de Khibina, Kola Peninsula (Russia) e Strange Lake (Canadá; reserva de 52 Mt com 0.54% ETR e 0.31% de Y_2O_3; **Figura 2**) são exemplos de complexos alcalinos, portadores de mineralização em ETR (Christie *et al*., 1998).

II.4.2 Sedimentares

Os depósitos sedimentares são do tipo *placer* e conglomerados (**Figura 2**), constituídos por detritos minerais oriundos de uma variedade de rochas desde veios de quartzo a rochas ígneas e/ou metamórficas. Concentrações económicas ocorrem em locais onde essas rochas produziram quantidades suficientes de minerais valiosos e as condições climáticas e geográficas permitiram a sua deposição. Minerais como a monazite e o xenótimo são explorados neste tipo de depósitos, associados a rútilo, ilmenite e zircão. Exemplos de depósitos do tipo *placer* são conhecidos na Austrália, Índia, Brasil, e Malásia, principais produtores; do tipo conglomerado, refira-se Elliot Lake (Canada) (Kanazawa *et al*., 2006).

II.4.3 Enriquecimento Residual e Supergénico

Depósitos formados por enriquecimento residual em clima tropical e sub-tropical (**Figura 2**). Os processos de meteorização incidem sobre complexos alcalinos e carbonatíticos ricos em ETR que, como elementos imóveis, são concentrados em horizontes do perfil de meteorização. Um exemplo deste tipo de depósitos é Jiangxi no sul da China, onde granitos com elevado conteúdo em ETR sofrem meteorização, sendo os ETR adsorvidos em níveis argilosos do perfil de meteorização. Como tal, os minérios são formados por adsorção iónica das ETR em argilas, sendo por isso designados "depósitos de adsorção iónica" (Kanazawa *et al*., 2006 e referências citadas). Os teores em REO são cerca de 1% e compreendem grande abundância de Sm, Eu e Tb, ou Y (Christie *et al*., 1998 e referências citadas).

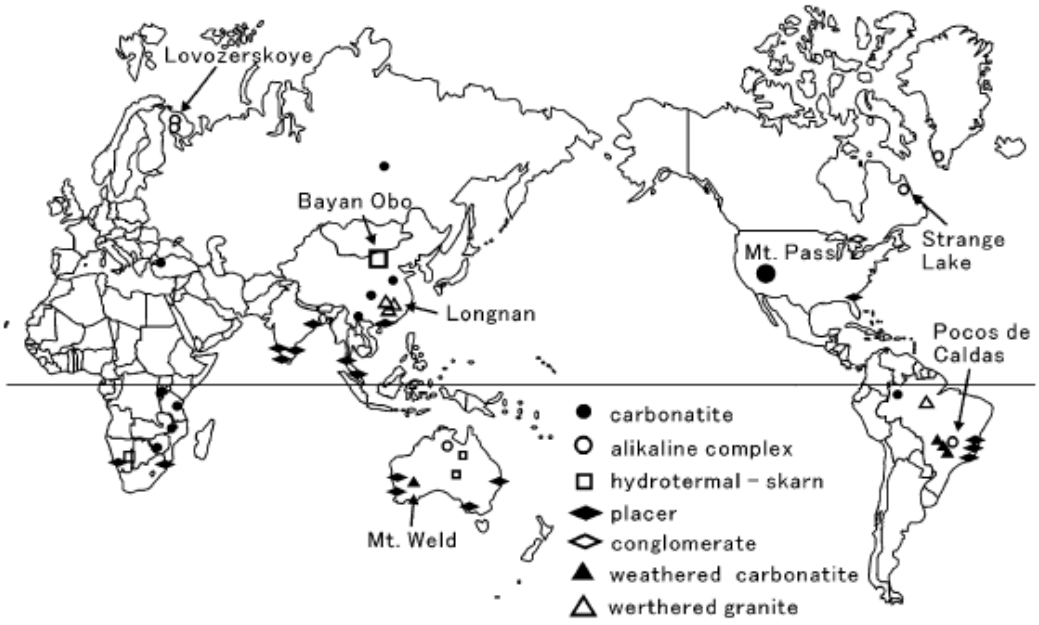


Figura 2. Distribuição mundial dos depósitos de ETR (*in* Kanazawa *et al*., 2006).

II.5 Reservas Mundiais Perspectivas Económicas

II.5.1 Enquadramento Histórico da Indústria de ETR

No curto período da história da industrialização das ETR, as reservas e produção mundial têm oscilado forte e bruscamente em diversos países (Lapido Loureiro, 1995).

Durante a sua descoberta (no período de 1794-1907) até meados dos anos 50, uma parte dos ETR eram produzidos com recurso a areias monazíticas oriundas de *placers* e veios, e como co-produtos da extracção de urânio e nióbio. A produção em larga escala teve início em 1885 no litoral brasileiro, terminando em 1915, data a partir da qual a Índia entra no mercado exercendo seu domínio durante 45 anos. A então chamada *Era Monazite* durou desde 1950 até 1964, ano em que termina abruptamente (**Figura 3**) (Haxel *et al.*, 2002; Lapido Loureiro, 1995).

Entre 1921 e 1934 ocorreu um decréscimo na produção, sendo produzido em média 0.261 kt como pode ser observado na **Figura 3**.

A descoberta da intrusão carbonatítica de Mountain Pass ocorre em 1949, apresentando conteúdos extraordinários em ETRL (8 a 12% REO) (**Figuras 4a e b**). Em 1965 os EUA tornam-se o maior produtor mundial, posição que manteve até 1984 (*Era Mountain Pass*) (**Figura 3**), permitindo a sua auto-suficiência em ETR. A monazite, que outrora constituía a principal fonte de abastecimento em ETR, é nesta altura substituída pela bastnäsite, o único bem mineral produzido em Mountain Pass. O desenvolvimento inicial de Mountain Pass foi suportado em grande parte pela procura de Eu em função da comercialização dos televisores a cores. Com um teor entre 5% e 9% e reservas aproximadas de 28 milhões de toneladas (Mt) de REO, continua a ser o único grande depósito explorado (actualmente com a exploração suspensa) somente pelo seu conteúdo em ETR (Haxel *et al.*, 2002).

Em 1970 a Austrália passa a produzir mais de 50% do total mundial de monazite (Lapido Loureiro, 1995).

Em 1984 e 1991 ocorreu um período de transição, onde surge em 1985**,** a China como um gigante, mas só em 1991 é que se inicia a *Era Chinesa* (**Figura 3**) pelas reservas, produção e comercialização; a produção aumenta dramaticamente como se pode observar na **Figura 3**. A produção provém de duas fontes, sendo a mais importante o depósito de Fe-Nb-ETR de Bayan Obo com teores em Fe, REO e Nb em média de 35%, 8% e 0.13%, respectivamente, aos quais se fazem corresponder reservas que se cifram em 1.5 mil milhões de toneladas métricas, 48 Mt e 1 Mt, respectivamente; estatísticas recentes apontam para 89 Mt de REO na China (Lapido Loureiro, 1995; Kanazawa *et al.*, 2006 e referências citadas; Yang *et al*., 2003). A segunda mais importante corresponde aos minérios de ETR de adsorção iónica no sul da China desenvolvidos em rochas graníticas e sieníticas. Contêm elevadas proporções de ETRP (**Figura 4a e b**) e, sobretudo, facilidade no processo de extracção. Continua até hoje a dominar o mercado de ETR (Haxel *et al.*, 2002). Ainda neste período podem ser citados outros factores marcantes: (i) disponibilidade, a baixos preços, de ETR do subgrupo do ítrio (Sm-Ho) provenientes dos minérios de adsorção iónica do sul da China; (ii) divulgação das grandes reservas de ETR da Comunidade dos Estados Independentes (CEI), resultantes de minerais pouco comuns que, à escala mundial, situam este país na segunda posição quanto a reservas e em terceiro lugar quanto à produção; e (iii) descoberta do importante jazigo de ETR no complexo carbonatítico de Mount Weld, Austrália (Lapido Loureiro, 1995).

De modo geral, podemos resumir a história da indústria mineira de ETR em quatro importantes períodos: 1885 (início da produção de ETR, *Era Monazite*), 1965 (*Era Mountain Pass*), 1970 (produção 50% do total mundial de monazite na Austrália) e 1985 (início da produção chinesa).

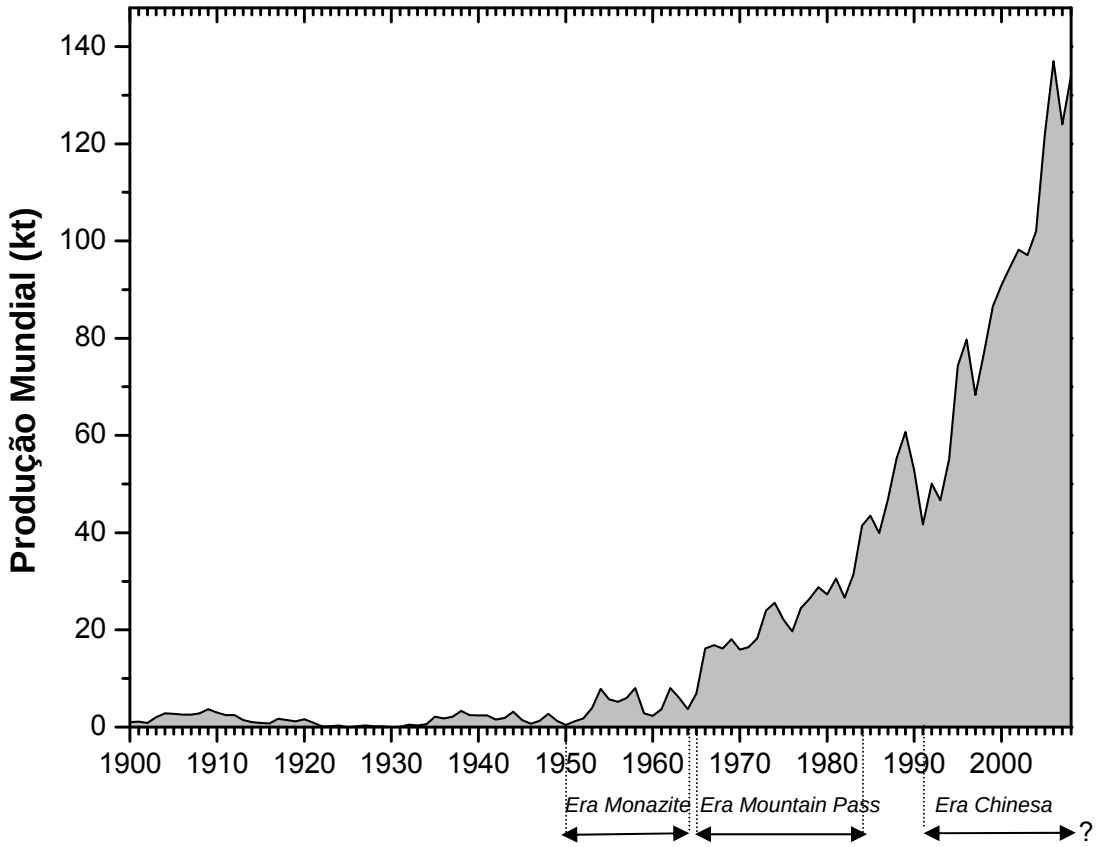
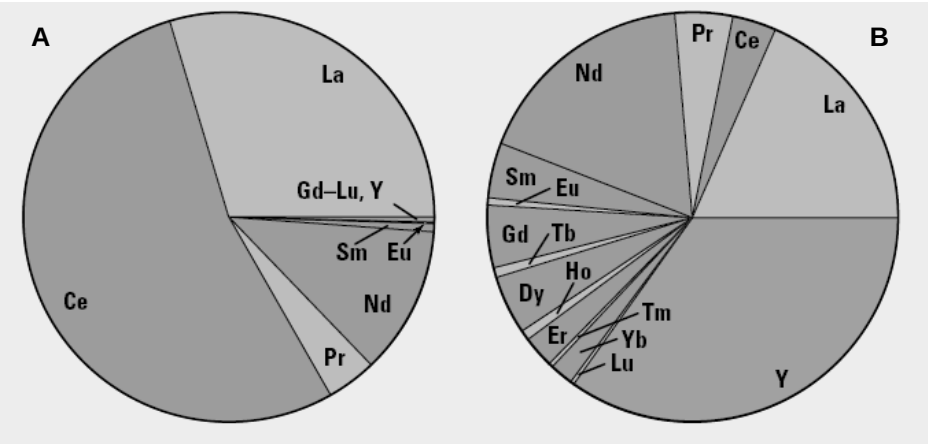


Figura 3. Produção global de ETR (1kt = 10^6 kg) desde 1900 até 2008 (U.S. Geological Survey, 2009).



Figuras 4a e b. Proporção individual dos ETR em dois tipos de minério: a) *bastnäsite* (Mountain Pass, Califórnia), dominado por La, Ce e Nd, com Eu ao Lu mais Y, num total de 0.4%; b) *argilas de adsorção iónica* (sul da China), com domínio de Y. A cinzento escuro e claro estão representados os ETR com número atómico par (incluindo o Y) e ímpar, respectivamente (adaptado de Haxel *et al.*, 2002).

II.5.2 Situação Económica Actual e Perspectivas Futuras

Nos últimos anos, as preocupações ambientais têm constituído um importante factor no número de explorações activas de ETR. Os minérios de monazite, por exemplo, contêm

normalmente elevados conteúdos em Th. No entanto, apenas se acompanhado por produtos-filho intermédios altamente radioactivos, em particular o radio (Ra), este elemento se torna fracamente radioactivo, podendo ser acumulado durante o processamento mineral (Haxel *et al.*, 2002). Os depósitos de bastnäsite na China e nos EUA constituem a maior percentagem de recursos económicos em ETR, enquanto que os depósitos de monazite na Austrália, Brasil, China, Índia, Malásia, África do Sul, Sri Lanka, Tailândia, e EUA posicionam-se em segundo lugar (Hedrick, 2010).

Em 2008, a produção mundial posicionou-se em torno de $124x10^3$ t para um total de reservas estimadas em $88x10^6$ t; em 2009, o total da produção mundial manteve-se nos $124x10^3$ t, mas o total de reservas aumentou para $99x10^6$ t (**Tabela 3**). Em Mountain Pass, a produção cessou em 2006; no entanto, o tratamento e beneficiação de minério em *stock* (bastnäsite) reiniciou em 2007 continuando a funcionar até ao momento (Hedrick, 2010; Mateus, 2009). Entre 1999 e 2000, mais de 90% dos separados de ETR usados nos EUA foram importados directamente da China ou por países que importam as suas matérias-primas da China. Entre 2005 e 2008, a China continua a ser a principal fonte de importação dos EUA (91%), seguida da França e Japão (3%), Rússia e outros países (1% e 2%, respectivamente; Haxel *et al.*, 2002; Hedrick, 2010). Factores que contribuíram para a dependência dos EUA incluem: (i) funcionários a baixo custo na China; (ii) crescimento contínuo da electrónica na Ásia; (iii) o número, tamanho e conteúdo favorável dos depósitos Chineses em ETRP e (iv) os problemas ambientais e de regulamentação em Mountain Pass (Haxel *et al.*, 2002). Na Austrália, as operações em Mt Weld iniciaram-se em 2008 e o *open pit* ficou operacional em Junho do mesmo ano. Um total de 773,000 t de minério foi extraído com um teor médio de 15.4% de REO; no entanto, nenhum tratamento de beneficiação foi projectado de modo a processar o minério em ETR. As actividades de prospecção continuam em várias outras regiões do mundo, como Bear Lodge (Wyoming), Diamond Creek (Idaho), Elk Creek (Nebraska), Hoidas Lake (Saskatchewan) e Thor Lake no Canadá, Kangankunde (Malawi), Lemhi Pass (Idaho-Montana), Nolans (Australia), entre outras localidades (Hedrick, 2010).

A demanda pelos compostos químicos de ETR tende a permanecer crescente nos próximos anos, tendo em vista o tipo de aplicações na indústria, nomeadamente no âmbito das tecnologias limpas de elevado desempenho e eficiência energética; exemplos de produtos de grande valor comercial são os componentes de nano-electrónica, baterias NiMH, neo-catalizadores e super-magnetes[1]. Estimativas actuais apontam para uma procura anual em cerca de 10.1% para os próximos 15-20 anos (o Japão, por exemplo, consumiu 32000 t em 2006, devendo atingir as 63000 t em 2010). A pressão colocada no abastecimento futuro (a curto/médio prazo) de ETR adquire maior relevância quando se considera o balanço produção/consumo chinês (a procura interna neste país deverá exceder a sua produção em 2012) e as restrições que, recentemente, têm sido colocadas na China quanto a algumas práticas mineiras em domínios aluvionares e litorais.

Tabela 3. Produção mineira mundial, reservas em ETR para 2008 e 2009 (*in* Hedrick, 2009 e 2010)

	Produção Mineira		Reservas (t)	Reservas (t)
	2008	2009	2008	2009
Estados Unidos da América	–	–	$13x10^6$	$13x10^6$
Austrália	–	–	$5,2x10^6$	$5,4x10^6$
Brasil	650	650	$48x10^3$	$48x10^3$
China	$120x10^3$	$120x10^3$	$27x10^6$	$36x10^6$
CEI	?	?	$19x10^6$	$19x10^6$
Índia	2,700	2,700	$1,1x10^6$	$3,1x10^6$
Malásia	380	380	$30x10^3$	$30x10^3$
Outros países	?	?	$22x10^6$	$22x10^6$
Total Mundial	$124x10^3$	$124x10^3$	$88x10^6$	$99x10^6$

Os teores de corte usados para as reservas das ETR variam consideravelmente dependendo do tipo de depósito, no entanto a maioria das concentrações económicas envolvem valores acima de 1.5% (REO). Em contextos carbonatíticos, alguns exemplos paradigmáticos revelam (Mateus, 2009):

1) Mountain Pass (Califórnia): 1,8 Mt @ 9% REO
2) Araxá (Brasil); domínio laterítico; 8,1 Mt @ 1.8% REO
3) Mount Weld (Austrália): 1,18 Mt @ 9.7% REO
4) Malásia: 37.7 Mt @ 1.16% REO
5) Nolaus Bora: 18,6 Mt @ 3.1% REO
6) Cummins Range (Austrália): 3,55 Mt @ 2% REO (contendo 11.2% P_2O_5)
7) Yangibana (Austrália): 3,5 Mt @ 1.7% REO

[1] Os super-magnetes são fundamentais na tecnologia automóvel e eólica do futuro; com o incremento dos motores eléctricos de elevado desempenho, a procura de Nd, Dy e Tb irá subir vertiginosamente (a menos que sejam encontrados substitutos). Em 2008, o kg de Nd, Dy e Tb foi comercializado a US$35, US$120 e US$740, respectivamente.

CAPÍTULO III

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

As primeiras referências a complexos anelares em Angola datam de 1939 por Polinard, no entanto, somente no trabalho de Machado (1958) são feitas referências a rochas carbonatíticas em quatro complexos ígneos (Capuia, Bailundo, Longonjo e Coola). Em 1962, foram descobertos os complexos alcalino-carbonatíticos de Bonga e Tchivira, mais tarde descritos em detalhe por Matos Alves (1966,1968), sendo Tchivira estudado também por Santos (1987) (Issa Filho *et al.*, 1991). A descoberta e estudos efectuados nestes complexos conduziram ao reconhecimento de quatro outros complexos: Virulundo, Lupongola, Monte Verde e Capunda (Lapido Loureiro, 1973). Em 1965, o Instituto de Geologia e Minas de Angola descobre e cartografa rochas carbonatíticas em Catanda e, em 1973, Lapido Loureiro apresenta uma monografia descrevendo as ocorrências carbonatíticas em Angola (Issa Filho *et al.*, 1991 e referências citadas).

O interesse por estes complexos aumentou nos anos 80, motivado por estudos de comparativos com análogos brasileiros, tendo Lapido Loureiro e Valderano (1980) juntamente com a Agência Internacional de Energia Atómica (*International Atomic Energy Agency* — IAEA) consubstanciado a proposta de uma extensa província alcalino-carbonatítica Angola-Brasil, geográfica e cronologicamente coerente (no contexto pré-deriva atlântica), petrograficamente semelhante (embora complexa e diversificada), geoquimicamente peculiar (manifestando tendências evolutivas no sentido W-E) e metalogenicamente significante (Santos *et al.*, 2009 e referências citadas). Investigações de natureza geoquímica (multi-elementar, incluindo isotópica) e geocronológica, forneceram dados essenciais à compreensão dos processos envolvidos na génese e evolução dos complexos carbonatíticos no contexto da fragmentação do continente Gondwana (e.g. Comin-Chiaramonti *et al.*, 2007; Coltorti *et al.*, 1983; Issa Filho *et al.*, 1991 e Alberti *et al.*, 1999).

O território Angolano, com uma área total de 1 246 700 km^2, situa-se na parte ocidental da África Austral. A sua extensão Norte-Sul é de cerca de 1300 km, e de Oeste a Leste,

aproximadamente de 1250 km. A Oeste contacta o Oceano Atlântico, tendo como limite Norte e Leste a República Democrática do Congo, a República da Zâmbia a Leste, e a Namíbia, a Sul (**Figura 5**). O território do País divide-se em 18 províncias: a Província de Luanda (capital da República), Cabinda, Zaire, Uige, Bengo, Cuanza-Norte, Cuanza-Sul, Malanje, Luanda-Norte, Luanda-Sul, Benguela, Huambo, Bié, Moxico, Namibe, Huíla, Cunene e Cuando-Cubango (Araújo *et al.*, 1992).

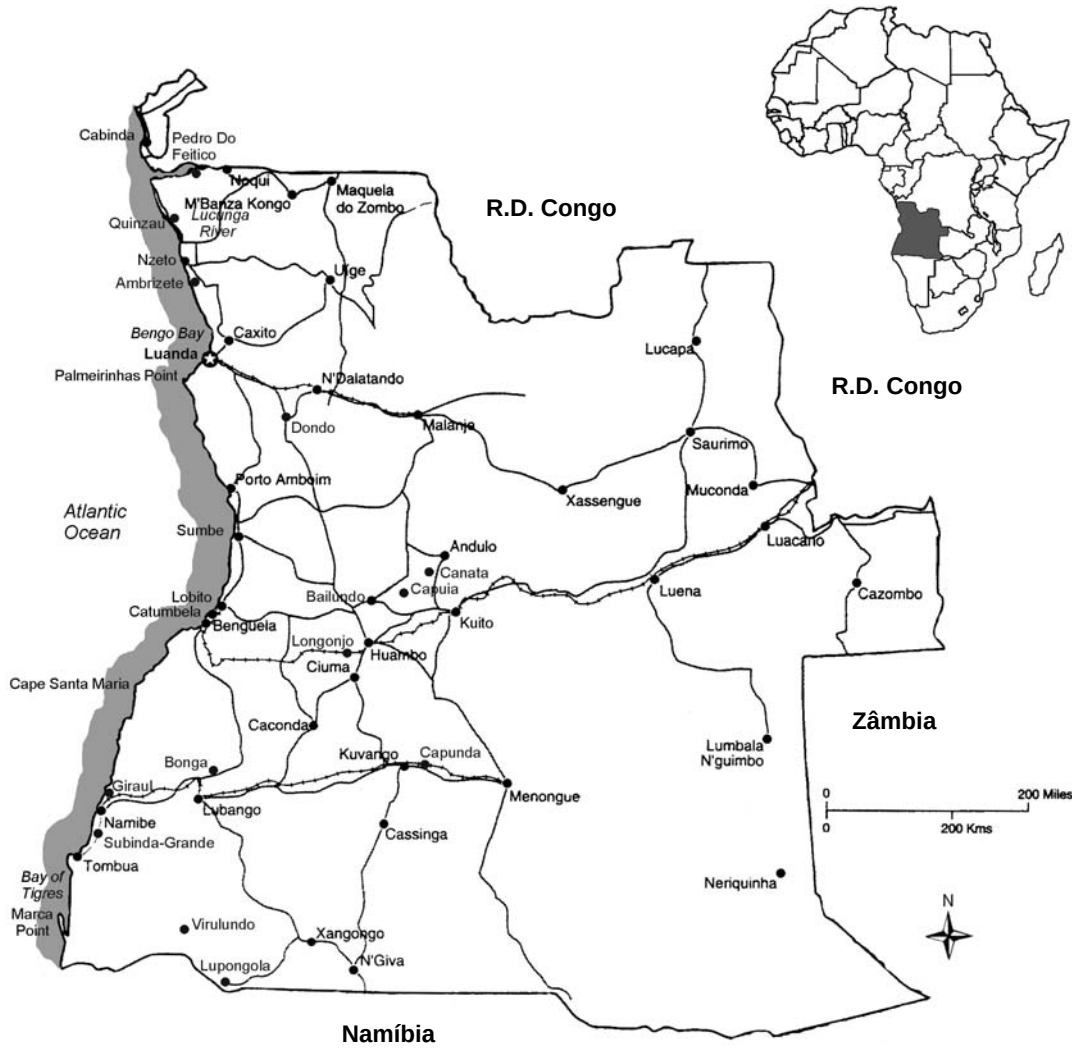


Figura 5. Localização Geográfica de Angola (*in* http://www.uoguelph.ca/~geology/rocks_for_crops/9angola.PDF).

A evolução da litosfera continental hospedeira do território de Angola é complexa, desenvolvendo-se durante vários ciclos tectónicos no decurso do *Arcaico Inferior*, *Arcaico Superior*, *Proterozóico Inferior*, *Proterozóico Superior*, *Paleozóico Superior* e *Meso-Cenozóico*. Durante o *Meso-Cenozóico*, nomeadamente na transição do Cretácico Inferior para o Tardio, o rejuvenescimento tectono-magmático da plataforma Africana condicionou a instalação de numerosos corpos quimberlíticos, rochas alcalinas, ultrabásicas e carbonatitos. Estas rochas localizam-se, principalmente, no seio da área da estrutura transcontinental de Lucapa, um rifte do

Cretácico Inferior, que se estende na direcção NE-SW ao longo de Angola (Araújo *et al.*, 1992; Robles *et al.*, 2008 e referências citadas). Associado a esta estrutura, no centro e sector nordeste, localizam-se diversos corpos quimberlíticos e, no sector sudoeste e centro, situam-se vários maciços de rochas alcalinas, ultrabásicas alcalinas e carbonatitos (Araújo *et al.*, 1992).

O magmatismo alcalino associa-se a zonas de fraqueza crustal, reactivadas em consequência da fragmentação continental. A expansão do oceano Atlântico (há cerca de 130 a 140 Ma), associado à deriva continental, parece ser o principal factor condicionante da distribuição das províncias alcalino-carbonatíticas nos dois lados do Atlântico Sul segundo alinhamentos que podem ter sido determinados ou modificados por estruturas pré-existentes. É neste contexto que surge a *Província Paraná-Angola-Namíbia (Etendeka)* (PAN) que se localiza na zona Centro-Sudeste do Brasil e Angola. Reconhece-se o maior agrupamento de rochas alcalino-carbonatíticas, perfazendo um total de 94 ocorrências entre os dois países. Em ambos, os limites são interrompidos por bacias e/ou coberturas sedimentares: a do Paraná no Brasil e as de Cassange (palograben) e do Kalahari em Angola. Tais ocorrências são agrupadas no Brasil em 5 conjuntos distintos (Alto Araguaia, Alto Paranaíba, Rio de Janeiro-Litoral de São Paulo, Sudeste e Sul) e 5 em Angola ((I) *Zenza do Itombe*, Norte de Angola (II) *Lucala-Caculo*, Malange (?), (III) *Cuanza Sul*, Benguela, (IV) *Diagonal Trans-Angolana* e (V) *Morro Vermelho*, Cuíto) (Lapido Loureiro, 1995).

Actualmente, em Angola, conhecem-se 45 complexos alcalino-carbonatíticos (**Figura 6**), os quais correspondem a estruturas (sub)intrusivas com morfologia (sub)circular que se distribuem ao longo de dois alinhamentos tectónicos intra-continentais activos desde o Cretácico Inferior (138-130 Ma) (Alberti, *et al.*, 1999; Lapido Loureiro, 1995). Distribuem-se por todo o território e, de acordo com critérios geográficos, tectónicos, cronológicos e petrográficos, agrupam-se nos 5 conjuntos referidos no parágrafo anterior (**Figura 6**). Ocorrem em três regiões principais: (1) zona centro-oeste (Catanda); (2) zona centro (Monte-Verde-Sulima, Bailundo, Coola, Longonjo, Tchivira-Bonga) e (3) zona sudoeste, perto da fronteira com a Namíbia (Virulundo, Lupongola) (Issa Filho *et al.*, 1991 — **Figura 6**). Complexos carbonatíticos, propriamente ditos, apenas são conhecidos na *Diagonal Trans-Angolana* e *Morro Vermelho*, ambos posicionados ao longo de alinhamentos de direcção SW-NE. A *Província Diagonal Trans-Angolana*, que se estende desde o litoral até à fronteira com a República Democrática do Congo (**Figura 7**), é a mais importante, pelo número e dimensão dos vários complexos carbonatíticos e/ou alcalinos, pela sua grande extensão e continuidade e ainda pela importância dos recursos minerais associados, destacando-se os diamantes.

Os complexos alcalino-carbonatíticos localizam-se, como seria de esperar, em regiões estáveis da crusta continental (escudos cratónicos), pois nestas condições os magmas têm possibilidade de se diferenciarem, em sistema fechado, sem perda significativa dos constituintes

voláteis, potenciando o desenvolvimento do carácter alcalino (Lapido Loureiro, 1995). A maioria dos complexos ocorrem no Escudo de Angola, Cratão do Congo (**Figuras 7 e 8**).

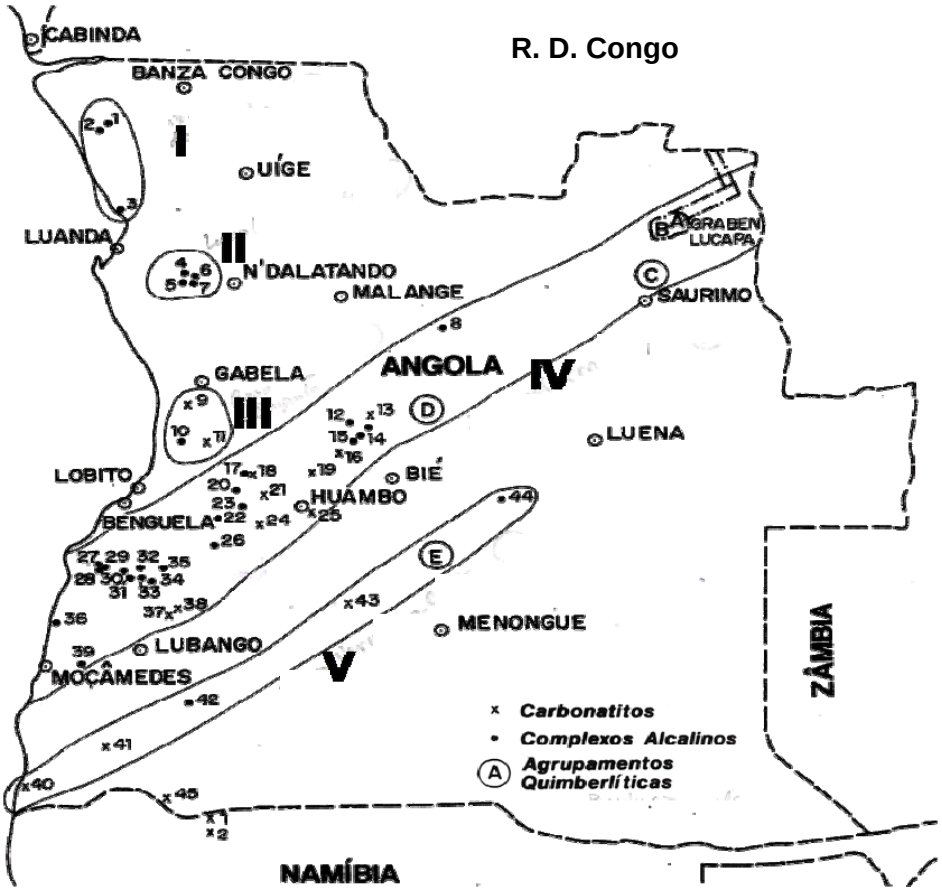


Figura 6. Distribuição das Províncias Alcalino-carbonatíticas de Angola (adaptado de Lapido Loureiro, 1995).

PROVÍNCIAS ALCALINO-CARBONATÍTICAS: I – *Zenza do Itombe*; **II** – *Lucala – Caculo*; **III** – *Kuanza Sul – Benguela*; **IV** – *Diagonal Trans-Angolana*; **V** – *Morro Vermelho – Cuito*.

COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTICOS: 1 - Uene. **2 -** Lucenha. **3 –** Mte. Quicolo. **4 -** Calucaia. **5 -** Quilungo. **6 -** Golungo Alto. **7 -** Quiculungo. **8 -** Calucinga. **9 -** Cuacra. **10 -** Chamaco **11 -** Catanda **12 -** Cácuvo. **13 -** Canata. **14 -** Gola. **15 -** Chiueca. **16 -** Capuia. **17 -** Sulima. **18 -** Mte. Verde. **19 -** Bailundo. **20 -** Chanja. **21 -** Coola. **22 -** Chimboa. **23 -** Quizua. **24 -** Longonjo. **25 -** Chianga. **26 -** Lungo. **27 -** Chacôa. **28 -** Lunde. **29 -** Chai. **30 -** Lutala. **31 -** Chitucubero. **32 -** Chiuerinde. **33 -** Nejoio. **34 -** Chicacimo. **35 -** Macula. **36 -** Chapéu Armado. **37 -** Tchivira. **38 -** Bonga. **39 -** Giraúl. **40 -** Morro Vermelho. **41 -** Virulundo. **42 -** Pocolo. **43 -** Capunda. **44 -** Cuito. **45 -** Lupongola.

Os complexos alcalino-carbonatíticos angolanos são constituídos por rochas alcalinas félsicas; os brasileiros, pelo contrário, estão intimamente relacionados com rochas plutónicas ultramáficas (piroxenitos, dunitos, peridotitos e glimeritos) (Lapido Loureiro, 1995). Intruem normalmente sequências Neo-Paleoproterozóico (Alberti *et al.*, 1999 e referências citadas) da unidade sul da África central, compreendendo os domínios cratónicos do Congo, Kasai e Angola (Alberti *et al.*, 1999 e referências citadas) (**Figura 8**). O encaixante é formado por granitos, rochas

metamórficas de grau médio a alto e migmatitos. Os carbonatitos de Lupongola intruem, pelo contrário, um complexo gabro-anortosítico (Alberti *et al.*, 1999 e referências citadas).

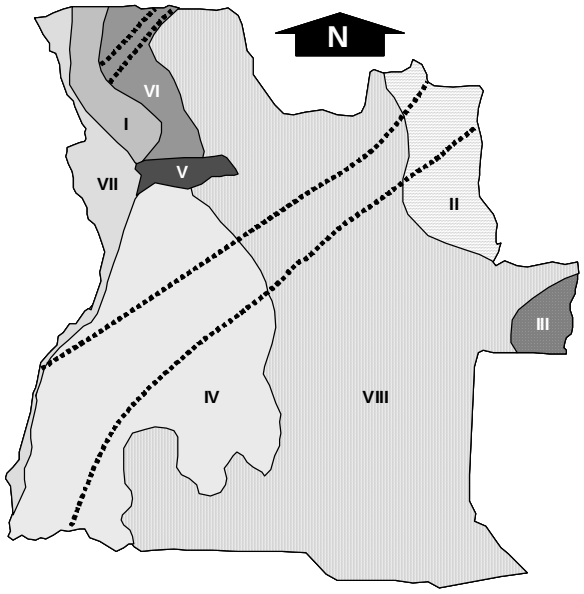


Figura 7. Principais unidades geotectónicas do território angolano (simplificado a partir de Araújo e Guimarães, 1995 *in* Mateus 2008). I – Escudo do Maiombe (Arcaico e Paleoproterozóico); II – Escudo do Cassai (Arcaico e Paleoproterozóico); III – Escudo do Bangweuto [Arcaico, Proterozóico (Paleo e Neo) e Mesozóico (Trias-Jura)]; IV – Escudo de Angola [(Arcaico) Paleoproterozóico e Neoproterozóico (especialmente para W)]; V – *Horst* Kwanza [Arcaico (Neoproterozóico – faixa estreita a S)]; VI – Aulacógeno do Congo Ocidental (Neoproterozóico); VII – Depressão Peri-oceânica (Mesozóico – Cenozóico); VIII – Depressões continentais do Congo e Okavango [Mesozóico – Cenozóico (muito espesso a Sul)]. As linhas a ponteado representam os limites da Diagonal Trans-Angolana; no sector NW.

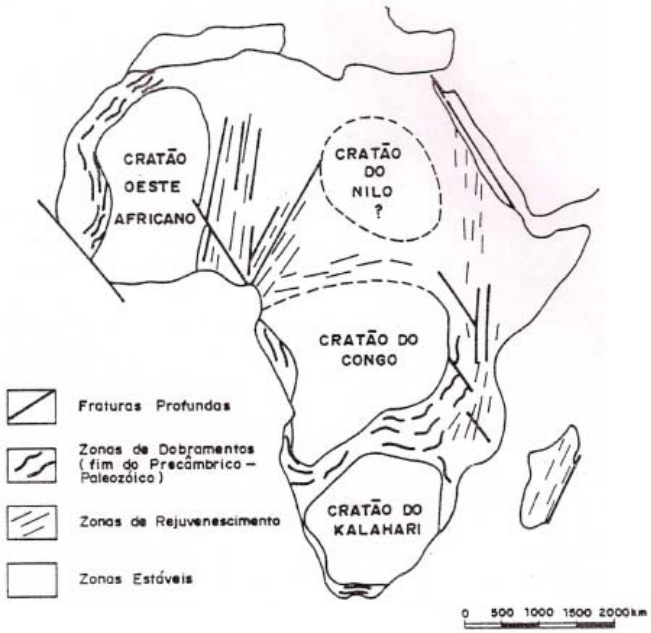


Figura 8. Estrutura geral de África segundo Rocci. É incerto se o cratão Oeste Africano constitui uma única unidade (*in* Lapido Loureiro, 1995).

Todos estes complexos ígneos integram a PAN, estando a maioria localizados no Arco de Moçâmedes, estrutura que representa a porção africana do Arco de Ponta Grossa no sul do Brasil, onde se encontram muitos outros complexos alcalino-carbonatíticos instalados durante o Cretácico Inferior (Alberti *et al.*, 1999 e referências citadas — **Figura 9**). A PAN é caracterizada por escudos de basaltos toleíticos e enxames de diques (133 Ma; Gomes *et al.*, 2006 e referências citadas) que ocorrem associados a complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos de idade Mesozóica a Paleogénica (Gomes *et al.*, 2006 e referências citadas). As ocorrências carbonatíticas podem ser agrupadas em três idades: Cretácico Inferior, Cretácio Superior e Paleocénico, o último representado apenas pelo SW da Namíbia (Gomes *et al.*, 2006 e referências citadas). A instalação dos complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos é claramente controlada por lineamentos tectónicos da plataforma da América do Sul activos pelo menos desde o Mesozóico Inferior (Gomes *et al.*, 2006). Um ambiente tectónico similar é inferido com base nas ocorrências africanas de Angola (e.g. Arco Moçâmedes) e Namíbia (e.g. cintura Damara) (Gomes *et al.*, 2006 e referências citadas).

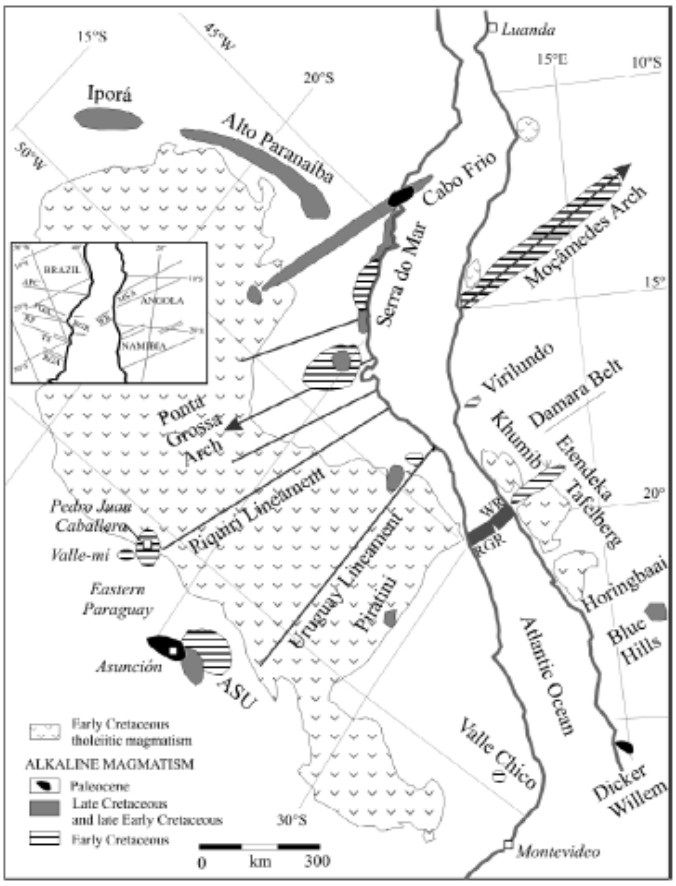


Figura 9. Distribuição do magmatismo na *Província Paraná-Angola-Namíbia (Etendeka)* (América do Sul e placa Africana, Gondwana Ocidental, à cerca de 110 Ma; modificado por Comin-Chiaramonti *et al.*, 1997, 2005) e localização das principais ocorrências alcalino-carbonatíticas: Jacupiranga (Ja), Juquiá (Ju), Barra do Itapirapuã (BdI), Mato Preto (MP), Rio Apa (RA), Cerros Chiriguelo e Sarambí (C-S), Asunción-Sapucai (ASU). Outras abreviaturas: Rio Grande Rise (RGR), Walvis Ridge (WR). *Inset*: lineamentos em toda a África e Brasil correspondem aos principais lineamentos dos complexos alcalinos (*in* Gomes *et al.*, 2006).

Os carbonatitos brasileiros (Província de Santa Catarina: Anitápolis e Lages; Arco de Ponta Grossa: Barra do Itapirapuã. Jacupiranga, Juquiá e Mato Preto; Província Alto de Paranaíba: Catalão, Salitre e Tapira) são bastante variáveis em termos de composição dos elementos maiores, sendo encontrados desde *cálcio* a *magnésio* e *ferro-carbonatitos*. Os carbonatitos Angolanos (Bailundo, Longonjo, Lupongola, Sulima e Tchivira-Bonga) mostram uma variação composicional maior que os análogos brasileiros para cada complexo (Gomes *et al.*, 2006).

O complexo alcalino-carbonatítico de Bailundo (CCB) situa-se na área abrangida pela folha 232 do mapa topográfico de Angola, na escala de 1/100 000 de coordenadas 12º 09' Lat. S / 15º 57' Long. E. Localiza-se a 11 km a NE da povoação de Bailundo e a cerca de 100 km a NNE da cidade de Huambo (Lapido Loureiro, 1995 – **Figuras 5 e 6**) numa região denominada Mungo. Apresenta morfologia típica de estrutura anelar. O anel periférico sobre-elevado é constituído por numerosas colinas com altitudes oscilando entre 1818 e 1650 m que se destacam da paleo-superfície de aplanação com altitude média de 1550 m, coberta por depósitos coluvionares-eluvionares relativamente espessos (≤ 15 m) ricos em (hidr)óxidos de ferro, assim como outras fases minerais de interesse económico. O substrato do anel periférico corresponde a *fenitos*, isto é, rochas resultantes da transformação dos granitos encaixantes por processos metassomáticos heterogéneos e intensos. O domínio central da estrutura, correspondendo ao Morro Belém (atingindo 1805 m de altitude), é constituído por dois tipos de rochas carbonatíticas, *cálcio-carbonatitos* e *ferro-carbonatitos* (**Figura 10**) (Lapido Loureiro, 1995).

O CCB está contido na *Diagonal Trans-Angolana* (**Figura 6**), que compreende três complexos anelares carbonatíticos, destacando-se o de Bailundo com importantes trabalhos de prospecção e pesquisa, bem como vários estudos de tratamento e beneficiação de minério de ferro, na década de 60 e início dos anos 70. Não existem dados geocronológicos para os complexos anelares abrangidos pela área de Huambo; estes são no entanto vulgarmente incluídos no conjunto das intrusões sienítico-traquíticas e carbonatíticas [ξ-φ] e [θ-ω] que, marcando diversos alinhamentos regionais segundo a direcção geral NE-SW, documentam importante actividade magmática durante o Albiano (Cretácico). Estes complexos anelares intersectam (e afectam metassomaticamente – fenitização) rochas constituintes das formações geológicas do Arcaico (nomeadamente metassedimentos do Grupo Superior [AR_1^2] e corpos graníticos yAR_2) e Proterozóico (sequências metassedimentares, como as que integram o Grupo Oendolongo [PR_1-*on*]), e granitóides yPR_1) (Araújo *et al.*, 1992; Lapido Loureiro, 1995; Mateus, 2008).

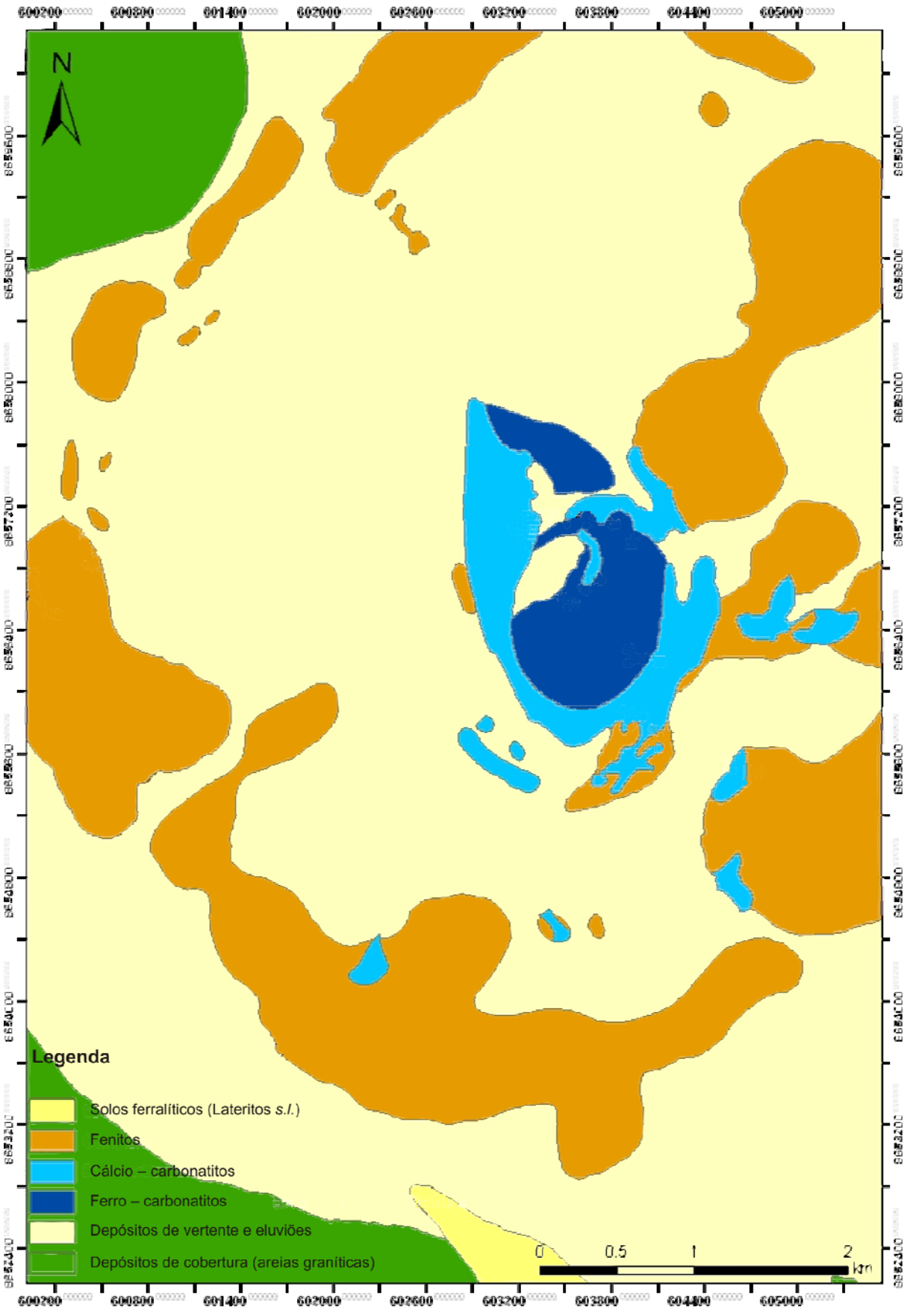


Figura 10. Mapa geológico de Bailundo.

CAPÍTULO IV
CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

IV.1 Introdução

O presente capítulo tem como principal objectivo a caracterização mineralógico-textural das fases minerais portadoras de ETR, fundamentando-se na caracterização de 81 amostras com referência BL-P 1 a BL-P 81, 28 das quais correspondem a *ferro-carbonatitos* (exemplares BL-P 9 a BL-P 15, BL-P 20 a BL-P 26, BL-P 34 a BL-P 38 e BL-P 40 a BL-P 48), 21 a *cálcio-carbonatitos* (BL-P 1 a BL-P 8, BL-P 16 a BL-P 19, BL-P 27 a BL-P 30, BL-P 39, BL-P 49 e BL-P 52 a BL-P 54) e 32 a *fenitos*. As amostras representativas dos *fenitos* foram subdivididas em três subconjuntos, com o intuito de avaliar a existência, ou não, de diferenças mineralógicas e químicas substantivas entre os sectores NE (BL-P 31 a BL-P 33), NW (BL-P 61 a BL-P 81) e SE (BL-P 51 e BL-P 55 a BL-P 60). No Anexo II (versão CD-ROM) encontra-se compilada a descrição petrográfica detalhada dos 81 exemplares observados.

A amostragem foi efectuada pela Genius Mineira Lda. no decurso dos levantamentos cartográficas, tendo como propósito o reconhecimento dos vários litótipos constituintes do CCB. A distribuição espacial das amostras colhidas encontra-se na **Figura 11**.

A preparação das amostras (lâminas delgadas polidas) ocorreu nos laboratórios do Departamento de Geologia da FCUL, tendo todas as amostras sido cortadas em serras diamantadas. A observação das lâminas foi efectuada ao microscópio óptico de luz transmitida e reflectida.

IV.2 Sinopse da Análise Petrográfica

Os minerais portadores de ETR são, em regra, explorados como sub-produtos de minérios polimetálicos. Como tal, previamente a uma análise petrográfica individual dos três subconjuntos principais (*ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*), incidindo sobre os minerais portadores de ETR, proceder-se-á a uma síntese das características texturais e mineralógicas das fases minerais não portadoras de ETR (silicatos, óxidos e hidróxidos de ferro), que, por conseguinte, podem representar minérios de valor económico (e.g. espinelas ferríferas); estas associações minerais encontram-se bem documentadas no trabalho de Santos (2010).

Em traços gerais, os carbonatitos (*ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos*) e *fenitos* observados revelam textura e natureza composicional relativamente heterogénea que se deve à sobreposição de transformações desencadeadas por processos tardi-magmáticos e metassomáticos, subsequentemente perturbadas pela meteorização química (Beleque *et al.*, 2009; Santos, 2010)

Para os *ferro-carbonatitos* destaca-se a presença abundante de espinelas ferríferas (magnetite *s.l.*) de origem magmática, muitas vezes constituindo bolsadas de granularidade grosseira (Estampa I.A), que preservam efeitos de oxidação intensa, geralmente materializada pelo desenvolvimento de orlas maghemíticas-hematíticas, muitas vezes substituídas por (hidr)óxidos de ferro (goethite, Estampa I.B). Processos metassomáticos, intensificados pela meteorização química, são responsáveis pelo desenvolvimento dos agregados de (hidr)óxidos de ferro e ainda hidróxido de Mn (romanechite, Estampa I.G), os quais ocorrem também no seio de fracturas que frequentemente desenvolvem redes anastomosadas. Nestas rochas, a matriz de granularidade fina a média é constituída essencialmente por agregados finos de quartzo ± carbonato, essencialmente dolomite/anquerite (Estampa ID) e, por vezes calcite, nas faixas de transição com os *cálcio-carbonatitos* (Estampa I.E). Regista-se a presença pontual de teniolite (Estampa I.F), (Beleque *et al.*, 2009; Santos, 2010).

Nos *cálcio-carbonatitos* a matriz, de proporção relativamente elevada, é predominantemente calcítica (granularidade grosseira — Estampas I.M e II.B), sendo por vezes anquerítica (Estampa I.L) e quartzosa (granularidade heterogénea — Estampa I.H). Efeitos de alteração tardia são evidenciados por piroxenas (granularidade fina) e clorites (granularidade grosseira — Estampa II.B), parcialmente substituídas por quartzo e calcite, respectivamente. A piroxena é uma fase acessória importante ocorrendo sob a forma de disseminações matriciais sub-euédricas e agregados com hábitos aciculares (Estampa I.J), botrioidais e dendríticos; surge por vezes no seio de precipitados hidrotermais que selam veios tardios, de morfologia xenomórfica e granularidade fina; no exemplar BL-P 54 foi possível identificar piroxena do tipo aegirina-augite (Estampa II.C). Grãos euédricos de apatite desenvolvem-se tardiamente na matriz e grãos de barite parecem ser parcialmente substituídos por quartzo e/ou carbonatos (Estampa II.A). Estes minerais ocorrem

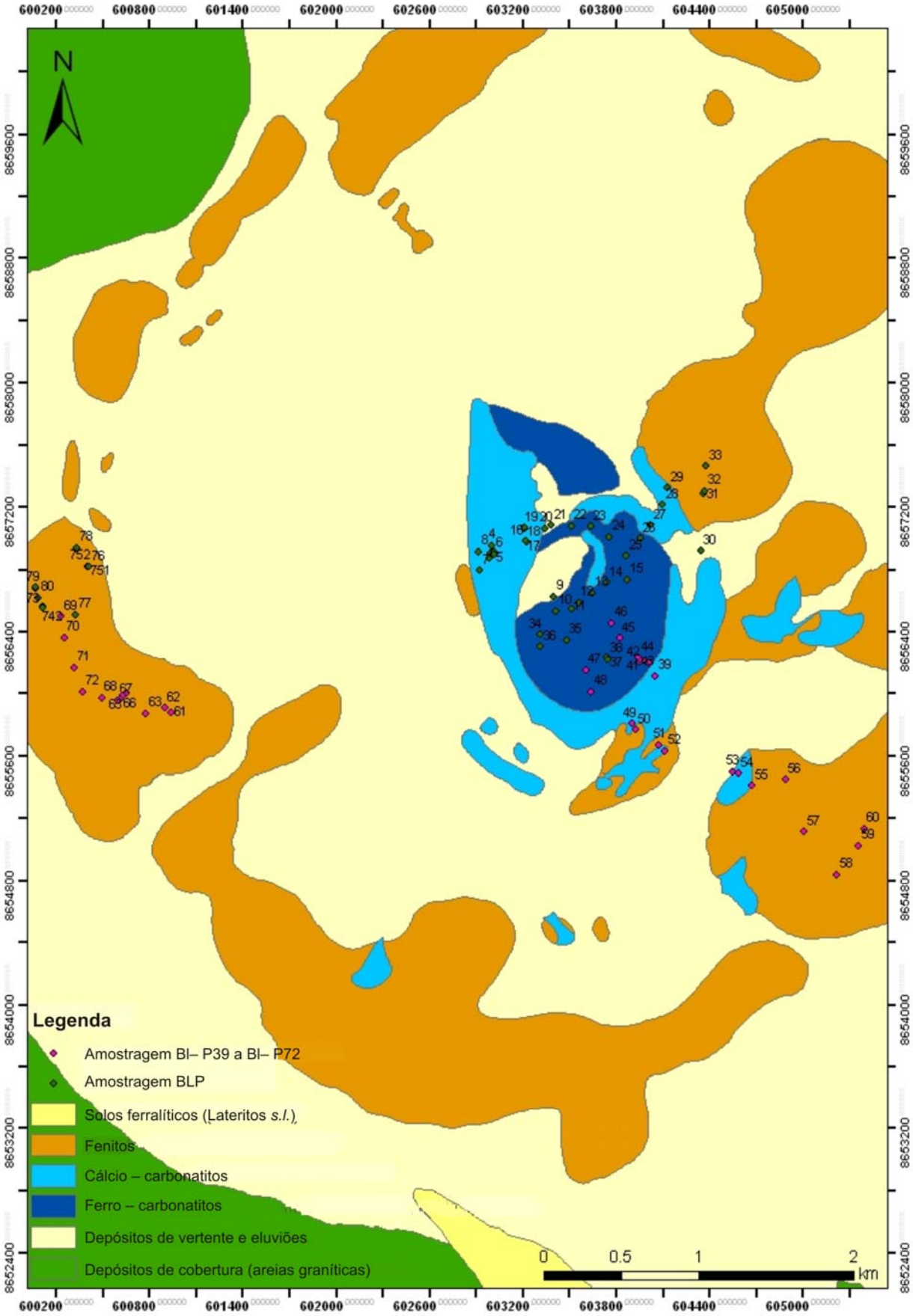


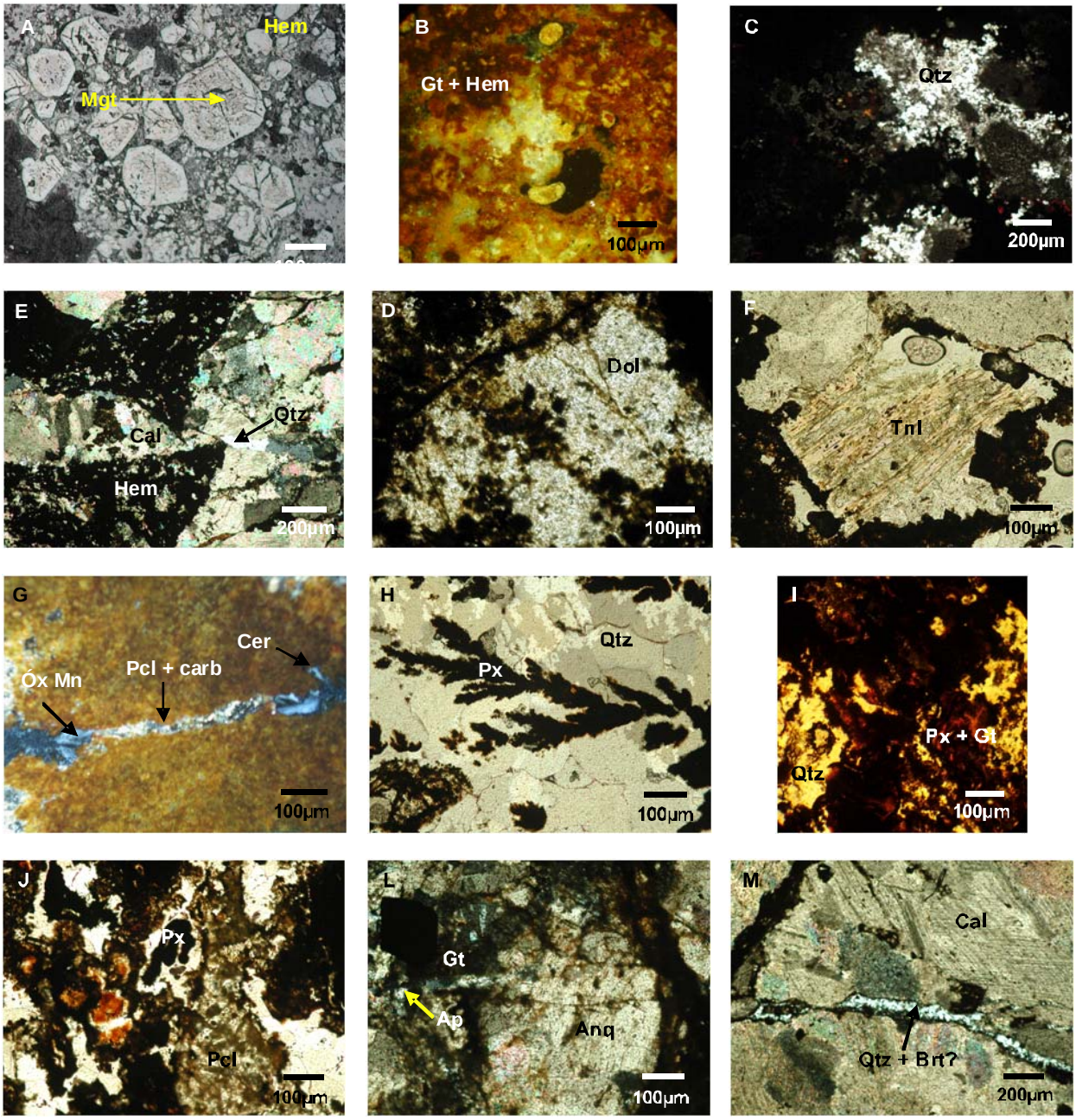
Figura 11. Localização dos exemplares colhidos para análise petrográfica.

também associados aos veios tardios, geralmente polifásicos em agregados finos xenomórficos (e.g. BL-P 30 e BL-P 39 – barite; BL-P 8 – apatite). Apesar de comuns, as espinelas magnetíticas, ao contrário do que acontece nos *ferro-carbonatitos*, não desenvolvem disseminações relevantes. (Hidr)óxidos de Fe surgem associados a estádios tardios da deposição mineral ao longo de veios (filonetes) e fracturas (Beleque *et al.*, 2009; Santos, 2010).

Em todos os complexos carbonatíticos, a presença de uma auréola de metassomatismo em torno dos mesmos é comum, resultado da transformação da rocha encaixante sujeita à interacção com fluidos residuais do processo de cristalização do carbonatito. As rochas metassomáticas são designadas *fenitos* e o processo *fenitização*, termo proposto por Brögger. Os produtos gerais da fenitização em encaixantes graníticos (como é o caso do CCB) parecem ser a diminuição gradual, ou perda total, do quartzo e o aparecimento de associações potássico-sódicas como piroxenas (aegirina), anfíbolas sódicas (e.g. arfvedsonite), nefelina, flogopite, feldspatos alcalinos, e carbonatos. Os *fenitos* podem ser ricos em sódio ou potássio, produzindo albite ± anfíbola sódica ± aegirina, ou feldspato alcalino, respectivamente (*Le Bas*, 1989; Matos Alves, 1967; Winter, 2001).

Para os *fenitos* do CCB, os efeitos heterogéneos do metassomatismo polifásico, concorrem para o desenvolvimento de associações minerais potássico-sódicas ricas em feldspato potássico (microclina — Estampa II.D), albite (Estampa II.E), piroxenas do tipo aegirina-augite (Estampas II.F. e G) e pontualmente anfíbola sódica? (Estampa II.E), localmente subsaturadas (denunciado pela possível presença de feldspatóides). Estas associações minerais constituem, por vezes, o preenchimento de veios e são localmente acompanhadas por óxidos de titânio, anátase ou broockite (Estampas II.H e I). (Hidr)óxidos de Fe preenchendo redes anastomosadas são muito abundantes, materializados pela paragénese hematite + goethite ± lepidocrocite (Estampa II.J), traduzindo meteorização química intensa. Relíquias de espinelas magnetíticas são raras observando-se processos de oxidação intensa materializada pelo desenvolvimento de orlas hematíticas (Estampa II.L). Regista-se a presença de barite em veio (Estampa III.A) e pontualmente zeólitos no preenchimento de cavidades (Estampa II.M). As rochas feníticas apresentam granularidade média a grosseira e evidenciam características imputáveis a processos de carbonatação e silicificação intensa, resultando matriz calcítica (Estampa III.C) ou quartzosa (Estampa III.B), respectivamente. A silicificação intensa é um aspecto interessante visto a fenitização ser um processo normalmente caracterizado pelo decréscimo de sílica; trata-se de quartzo microcristalino, muitas vezes preenchendo veios e filonetes tardios em conjunto com outras fases silicatadas (e.g. piroxenas). Neste contexto, afigura-se plausível interpretar o incremento não expectável em sílica como resultado de eventos tardios de silicificação (após o essencial do metassomatismo alcalino que caracteriza a fenitização) (Beleque *et al.*, 2009; Santos, 2010).

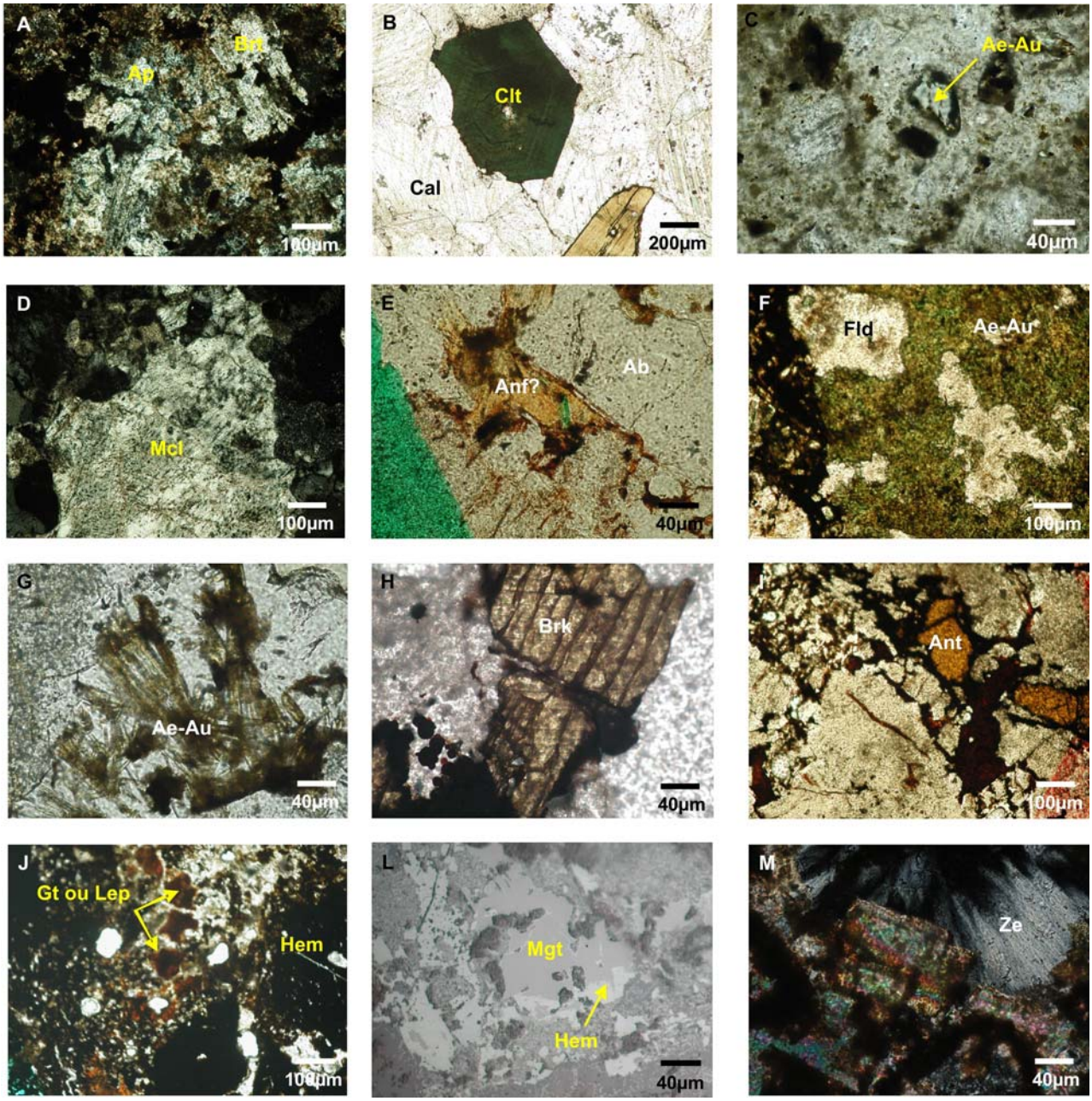
ESTAMPA I



Estampa I. Ferro-carbonatitos: **A** – bolsadas de magnetite (Mgt) com desenvolvimento de orlas maghemíticas-hematíticas (Hem); **B** – Goethite (Gt) + Hematite (Hem); **C** – agregados finos de quartzo (Qtz) matricial; **D** – agregados finos de dolomite (Dol) matricial; **E** – cristais de calcite quartzo matricial; **F** – cristal de teniolite (Tnl); **G** – desenvolvimento de agregados de (hidr)óxidos de Mn (romanechite); grãos de cerianite (Cer) de dimensão muito reduzida disseminados na matriz e pirocloro (Pcl). Cálcio-carbonatitos: **H** – matriz de quartzo com piroxenas (Px) tardias de granularidade fina; **I** e **J** – disseminações matriciais sub-euédricas e agregados aciculares, botrioidais e dentríticos de piroxena (luz transmitida, polaróides paralelos); **L** – matriz anquerítica (Anq); agregados finos de apatite (Ap); **M** – matriz calcítica (Cal); filonete com quartzo e possível barite (Brt).

A – luz reflectida, polaróides paralelos; **B** – luz reflectida, polaróides cruzados; **C**, **D**, **E**, **F**, **G**, **L** e **M** – luz transmitida, polaróides cruzados; **H**, **I** e **J** – luz transmitida, polaróides paralelos.

ESTAMPA II



Estampa II. Cálcio-carbonatitos: **A** – cristais de apatite (Ap) e barite (Brt); **B** – grãos grosseiros sub-euédricos de clorite (Clt) tardia; **C** – cristais de piroxena do tipo aegirina-augite (Ae-Au); Fenitos NW: **D** – associações minerais potássico-sódicas ricas em feldspato potássico, microclina (Mcl); **E** – feldspato sódico, albite (Ab) e possível cristal de anfíbola (Anf); **F** e **G**– agregados prismáticos grosseiros, sub-euédricos a euédricos, de piroxenas do tipo aegirina-augite (Ae-Au); **H** – óxido de titânio identificado como possível broockite (Brk); **I** - óxido de titânio identificado como possível anátase (Ant); **J** – agregados e redes anastomosadas de (hidr)óxidos de Fe materializados pela paragénese hematite (Hem) + goetite (Gt) ± lepidocrocite (Lep); **L** – relíquias de espinelas magnetíticas (Mgt) sujeitas a processos de oxidação levando ao desenvolvimento de orlas hematíticas (Hem); Fenitos NE: **M** - cristais de zeólito no preenchimento de uma cavidade (Ze).

A, **D** e **M** – luz transmitida, polaróides cruzados; **B**, **C**, **E**, **F**, **G**, **H**, **I** e **J** – luz transmitida, polaróides paralelos; **L** – luz reflectida, polaróides paralelos.

As fases acessórias potenciais portadoras em ETR são diversas e comuns nos exemplares dos *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos*, e menos comuns nos exemplares dos *fenitos*. As descrições petrográficas serão apresentadas, de seguida, em subcapítulos individuais segundo as três litologias constituintes do CCB.

IV.3 Ferro-carbonatitos

Os processos tardios (discutidos no Capítulo VII), subsequentemente intensificados pela meteorização química, são cruciais ao desenvolvimento de associações mineralógicas singulares que, com frequência, constituem disseminações matriciais tardias e preenchimentos de redes anastomosadas de veios, filonetes e venulações. É o caso dos flúor-carbonatos, fosfatos e algum do pirocloro observado.

As fases óxido são representadas pelos minerais pirocloro e cerianite. O pirocloro constitui uma fase acessória importante em todas as litologias do CCB, apresentando dois modos de ocorrência. Encontra-se disseminado na matriz em grãos euédricos grosseiros, tons acastanhados e isótropos (Estampas III.E), maioritariamente fracturados e preenchidos por fases tardias, com granularidade fina, de quartzo e (hidr)óxidos Fe (Estampas III.D_{1-2}) e (hidr)óxidos Fe e barite (Estampa III.E); também integra os precipitados hidrotermais que selam veios e filonetes, apresentando granularidade fina e morfologia xenomórfica, intercrescido com quartzo de granularidade fina a média (Anexo II, BL-P 35 e BL-P 36).

Os grãos de cerianite, fases secundárias de ETR menos abundantes, ocorrem, por exemplo na amostra BL-P 26 (Estampa I.G) e, correspondem a grãos de dimensão muito reduzida disseminados na matriz silicatada (quartzo), provavelmente resultantes da alteração de um grão mineral pré-existente cujas características ópticas não permitem a sua identificação fidedigna.

As fases fosfatadas são relativamente frequentes nas litologias constituintes do CCB, constituindo algumas delas, fonte primordial de ETR; tal é o caso dos minerais do grupo da rabdofanite (brockite e rabdofanite). Constituem disseminações matriciais tardias e preenchimentos de redes anastomosadas de veios, filonetes e venulações. Os fosfatos da amostra BL-P 34 (rabdofanite) representam agregados que selam um veio, cuja granularidade e morfologia em espícula atestam o seu carácter tardio (Estampa III.F). Juntamente com estes fosfatos reconhecem-se grãos de pirocloro com morfologia xenomórfica. Na amostra BL-P 43, os fosfatos (brockite) surgem com granularidade muito fina e preenchem (sem nenhuma outra fase mineral) micro-venulações anastomosadas que cortam indiscriminadamente a rocha *ferro-carbonatítica* (Estampa III.G).

Os flúor-carbonatos são comuns no CCB, constituindo potencial fonte de ETR. Segundo Issa Filho *et al*. (1991), minerais do grupo dos flúor-carbonatos (tais como a parisite) são vulgares em todos os tipos de carbonatitos, sendo preferível referenciá-los genericamente como *flúor-*

carbonatos de *Ca* e *ETR* uma vez que a identificação sistemática de ocorrências de grão fino e hábito fibroso, não raras vezes formando inter-crescimentos complexos, é impraticável. O modo de ocorrência mais comum corresponde a preenchimentos tardios (intersticiais ou em fracturas), muitas vezes associados a produtos de transformação dos carbonatos pré-existentes (designadamente anquerite) durante processos metassomáticos/hidrotermais. Nos exemplares *ferro-carbonatíticos* estudados, ocorrem sob a forma de disseminações matriciais de grão fino com morfologia esferóidal, radial ou fibrosa, podendo também selar redes anastomosadas de venulações (Estampas IV.F, G e H) resultantes de processos metassomáticos (alguns dos quais subsequentemente intensificados pela meteorização química). Também ocorrem intercrescimentos finos entre diversas fases minerais (em veios e venulações) com morfologia xenomórfica. Regista-se a presença de misturas entre fosfatos e titano-fosfatos de ETR, (hidr)óxidos de Fe e carbonatos matriciais diversos (calcite, dolomite e anquerite) (Estampa III.F e G).

IV.4 Cálcio-carbonatitos

O pirocloro, tons castanhos e isótropo, é uma fase acessória bastante comum, formando disseminações matriciais precoces (geralmente grãos grosseiros (sub)euédricos – Estampa III.H e Anexo II, BL-P 1) ou integrando as associações minerais que constituem o preenchimento dos veios/filonetes tardios (grãos xenomórficos de fina dimensão), as quais são dominadas por quartzo grosseiro.

No que respeita aos flúor-carbonatos, regista-se a presença de parisite nos exemplares BL-P 27 e 39 (Estampa IV.A e III.H, respectivamente). A identificação correcta de outras fases minerais não foi possível mercê das dificuldades encontradas na observação petrográfica, isto é, devido aos intercrescimentos finos entre flúor-carbonatos de ETR (parisite, synchisite, bastnasite) e outras fases minerais tais como (hidr)óxidos de Fe (BL-P27, BL-P39 e BL-P53), óxidos de Mn e Ba (romanechite na BL-P53 — Estampa III.J e witherite e/ou barite na BL-P39). Intercrescimentos entre parisite, synchisite e bastnasite foram também identificados na amostra BL-P39. Agregados minerais de grão fino e morfologia esferoidal, radial e fibrosa, disseminados na matriz correspondem a flúor-carbonatos (BL-P 27).

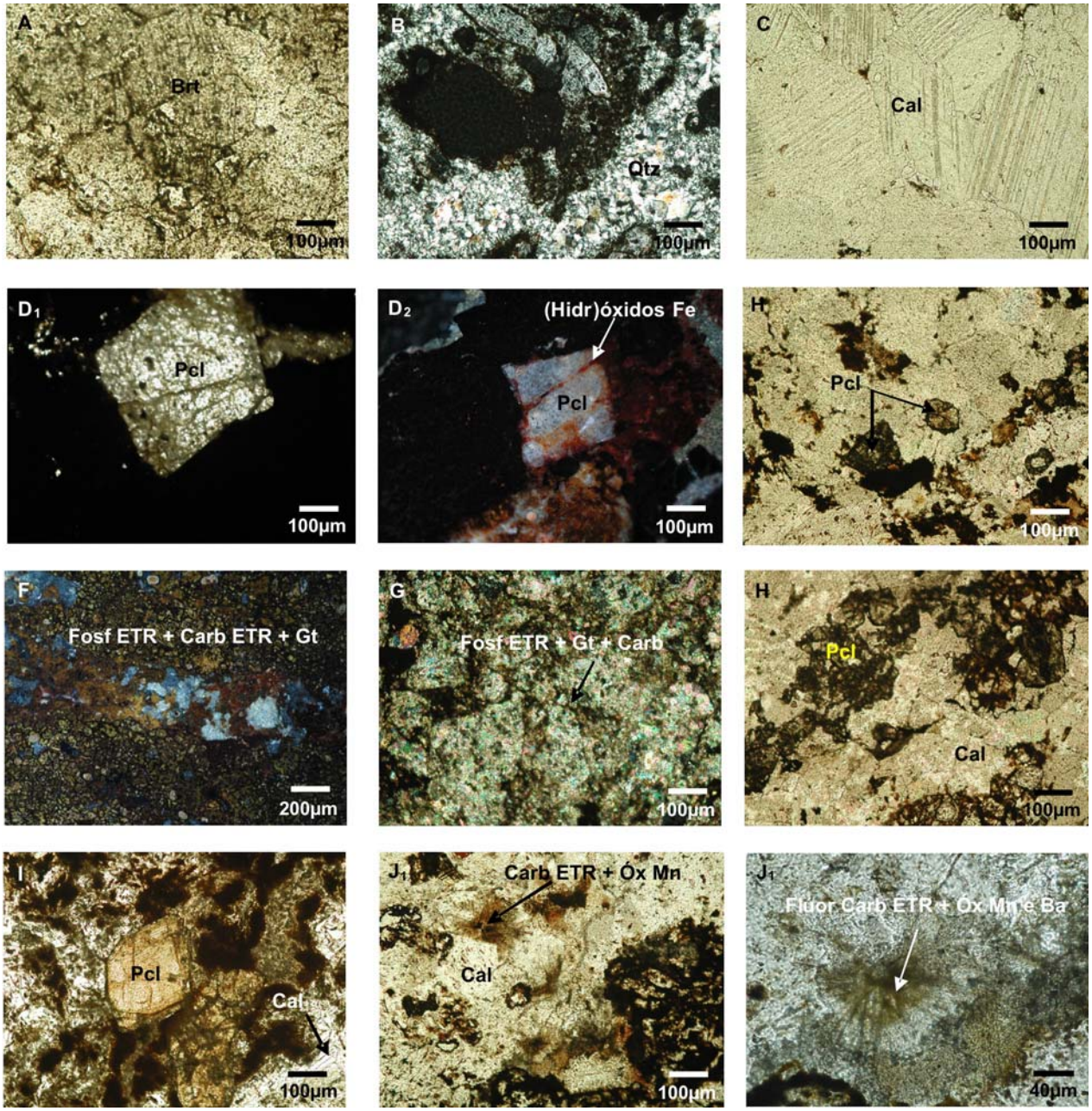
As fases fosfatadas são representadas por raros grãos de apatite disseminados na matriz (Anexo II, BL-P 28).

IV.5 Fenitos

As fases acessórias portadoras de ETR são relativamente abundantes nos *subconjuntos NE* e *SE*, tendo-se identificado pirocloro e apatite.

Os grãos de apatite, cristais incolores, relevo moderado e isótropos, em secções prismáticas e basais, constituem bolsadas características do *subconjunto NE* (Estampa IV.C_{1-2}) e

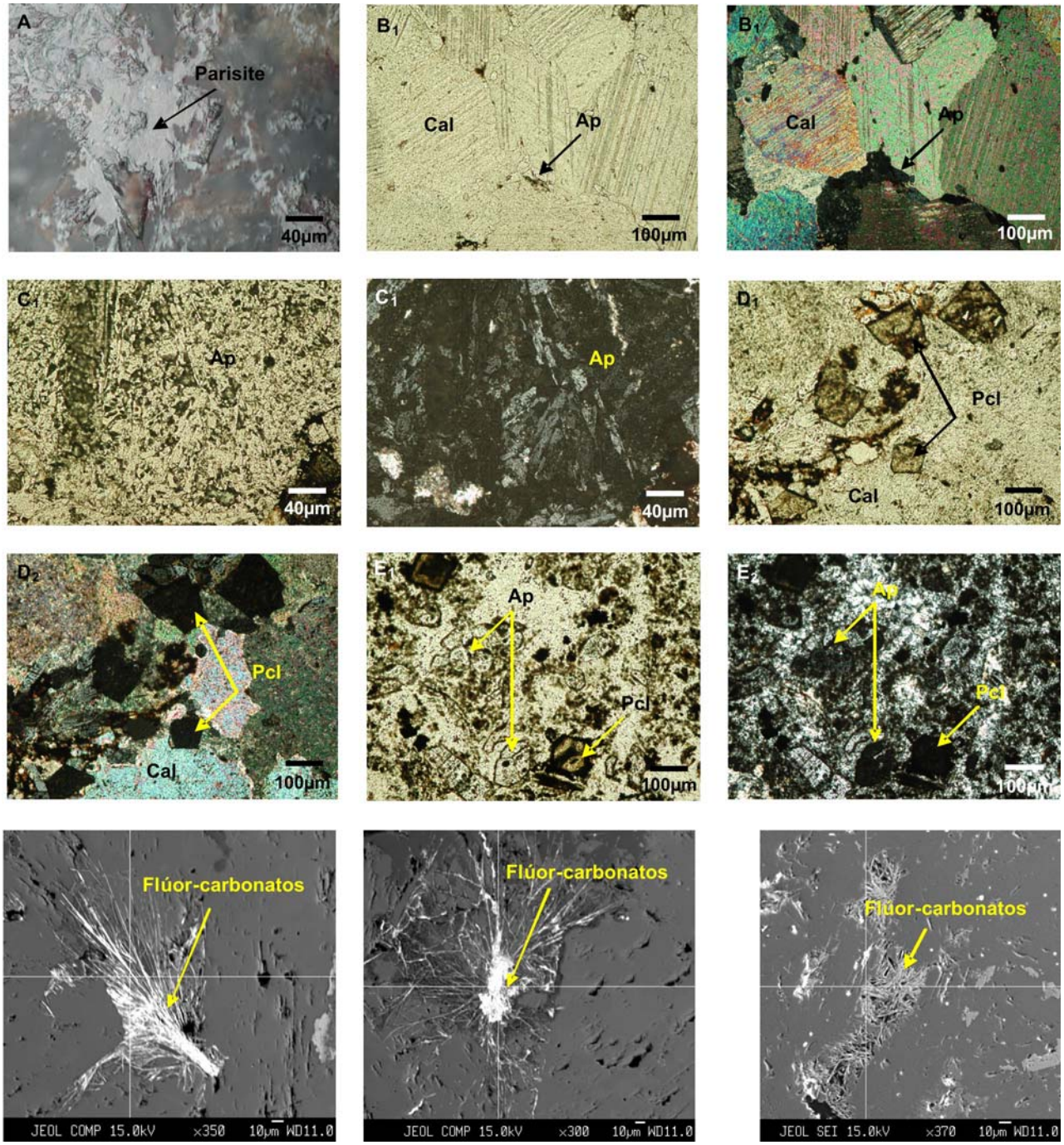
ESTAMPA III



Estampa III. Fenitos NW: **A** – cristais de barite (Brt) no preenchimento de um veio; Fenitos NE: **B** - processos de silicificação intensa materializados por uma matriz de quartzo (Qtz); *Fenito SE*: **C** – processos de carbonatação intensa materializados por calcite (Cal) matricial. Ferro-carbonatitos: **D_1**, **D_2** e **E** – pirocloro (Pcl) euédrico de granularidade média a grosseira dissemninado na matriz e fracturas preenchidas por hematite (Hem); **F** – agregados tardios de fosfatos de ETR (rabdofanite) a selarem um veio de granularidade fina e morfologia em espícula; **G** – fosfatos de ETR (brockite) de granularidade muito fina no preenchimento de microvenulações anastomosadas que cortam indiscriminadamente a rocha; Cálcio-carbonatitos: **H** – disseminações matriciais de cristais grosseiros de pirocloro; **I** – disseminações de cristais de pirocloro grosseiros e flúor-carbonatos de granularidade muito fina; **J_{1-2}** – intercrescimentos finos entre flúor-carbonatos de ETR e (hidr)óxidos de Fe, Ba (barite) e Mn (romanechite).

A, **C**, **D_1**, **E**, **H**, **I**, **J_1** e **J_2** – luz transmitida, polaróides paralelos; **B**, **F** e **G** – luz transmitida, polaróides cruzados; **D_2** – luz reflectida, polaróides cruzados.

ESTAMPA IV



Estampa IV. Cálcio-carbonatitos: **A** – cristais de parisite (fotomicografia em luz reflectida); Fenitos SE: **B_{1-2}** – cristais prismáticos e basais de apatite (Ap) disseminados numa matriz calcítica (Cal); Fenitos NE: **C_{1-2}** – agregados grosseiros de apatite; **D_{1-2}** – cristais grosseiros de pirocloro (Pcl) euédrico a sub-euédrico disseminados na matriz calcítica (Cal); **E_{1-2}** – processo de silicificação intensa materializado por quartzo (Qtz) matricial e cristais de pirocloro (Pcl) disseminados na matriz; Ferro-carbonatitos: **F**, **G** e **H** – disseminações finas matriciais com morfologia radial ou fibrosa de flúor-carbonatos.

A – luz reflectida, polaróides paralelos; **B_1**, **C_1**, **D_1**, **E_1** – luz transmitida, polaróides paralelos; **B_2**, **C_2**, **D_2** e **E_2** – luz transmitida, polaróides cruzados; **F**, **G** e **H** – imagens de electrões retro-difundidos obtidas em microssonda electrónica.

apenas num exemplar do *subconjunto SE* (Estampa IV.B_{1-2}), provavelmente associadas a fenómenos tardi-magmáticos síncronos da consolidação do corpo ígneo e da fenitização. São muitas vezes encontrados nas fronteiras entre os grãos de carbonato (calcite) que compõem a matriz, aos quais se associam por vezes hidróxidos de Fe (goethite) (Estampa IV.B_{1-2}).

O pirocloro, de cor castanha e isótropo, é apenas comum nos exemplares que constituem o *subconjunto NE* (Estampa IV.D_{1-2}), ocorrendo sob a forma de grãos euédricos; aparenta resultar também de processos metassomáticos relativamente precoces. Alguns grãos parecem ter sido corroídos permitindo observar quartzo matricial (Estampa IV.E_{1-2}).

Neste subconjunto litológico não foram identificadas fases flúor-carbonatadas.

Os exemplares com matriz carbonatada (e.g. BL-P 31 e BL-P 51) podem corresponder a diques cálcio-carbonatíticos e não a processos de carbonatação durante o processo de fenitização. Este facto afigura-se plausível pela similaridade das características mineralógicas e texturais com exemplares de *cálcio-carbonatitos*. A amostra BL-P 51 situa-se próxima do contacto com os *cálcio-carbonatitos* (**Figura 11**), pelo que possíveis erros associados à delimitação do contacto ou à projecção das coordenadas, levam a crer que possa corresponder ao subconjunto *cálcio-carbonatítico*.

CAPÍTULO V
QUÍMICA MINERAL

V.1 Introdução

O presente capítulo aborda o trabalho de química mineral efectuado com o objectivo de obter dados analíticos quantitativos que permitam caracterizar as amplitudes de variação composicional admitidas pelas fases minerais de interesse económico, isto é, portadoras de ETR e Y, como sejam óxidos, fosfatos e flúor-carbonatos. Procura-se encontrar resposta para as questões seguintes, que se afiguram relevantes ao tratamento e beneficiação de minérios: (i) quais os principais minerais portadores de ETR e Y?; (ii) que elementos químicos acompanham os ETR e Y nos referidos minerais?; (iii) qual a variação composicional admitida por essas fases minerais e de que forma varia com o tipo de rocha que as hospeda? e quais os efeitos da meteorização sobre as fases minerais portadoras de ETR e Y?.

Com vista à aquisição dos dados realizaram-se análises em microssonda electrónica a 62 lâminas delgadas polidas previamente seleccionadas, representativas dos três subconjuntos principais (i) *ferro-carbonatitos*, (ii) *cálcio-carbonatitos* e (iii) *fenitos*, correspondentes a 19, 16 e 27 lâminas, respectivamente. Os minerais portadores em ETR serão analisados em subcapítulos independentes.

V.1.1 Condições Analíticas

O trabalho analítico foi dividido em duas partes, a primeira das quais, qualitativa, de forma a minimizar os problemas decorrentes da análise rigorosa de minerais portadores de ETR, há muito reconhecida na literatura. Ou seja, os ETR originam número elevado de picos, e têm tendência

para ocorrer não isoladamente, mas em grupo, com a consequente emissão de radiação característica em comprimentos de onda muito próximos. Os seus minerais portadores são frequentemente complexos e apresentam composição variável, originando dificuldades na determinação dos seus fundos de emissão, essencial numa análise quantitativa fidedigna, para além das interferências mútuas entre os vários metais presentes em cada mineral. Dificuldades acrescidas decorrem da zona espectral comum entre os ETR e os metais alcalino-terrosos, que podem também integrar as estruturas dos minerais portadores de ETR. Assim, numa primeira análise qualitativa identificaram-se os constituintes fundamentais e acessórios dos minerais, permitindo (i) listar os elementos a analisar quantitativamente; (ii) minimizar as interferências mútuas seleccionando a linha espectral mais adequada e (iii) melhorar o rigor analítico, escolhendo para cada composição química pontos de medida do fundo em comprimentos de onda totalmente desprovidos de emissões características de outros elementos presentes que não os de interesse.

As análises químicas pontuais (qualitativas e quantitativas) foram realizadas com a microssonda electrónica JEOL JXA 8200 (Centro de Geologia – FCUL) equipada com quatro espectrómetros WDS, 7 cristais analisadores (TAP, DEE2, LIF, LIFH, PET, PETH e PETJ) e detectores de electrões secundários e retrodifundidos, para além de um espectrómetro de dispersão de energia (EDS). As análises qualitativas apresentam limites de detecção equivalentes aos das análises quantitativas, mas são extremamente demoradas. Optou-se, por isso numa primeira fase, por análises mais expeditas, com varrimento integral do espectro electromagnético acessível ao instrumento, mas com limites de detecção estimados em cerca de 0.03-0.05% em peso de cada elemento. Estas análises foram realizadas com feixes de diâmetro 5 μm (exceptuando carbonatos, para os quais se usam diâmetros variáveis entre 20 e 30 μm), 25 nA de corrente de emissão, 15 kV de potencial de aceleração e varrimento nos cristais analisadores (**Tabela 4**):

Tabela 4. Condições de leitura/medição da análise qualitativa.

Cristal: PET	Cristal: LIFH	Cristal: TAP
Início: 61.891 mm	Início: 86.424 mm	Início: 61.926 mm
Fim: 259.526	Fim: 239.500 mm	Fim: 259.536
Passo: 50 micro m	Passo: 50 micro m	Passo: 50 micro m
Amostragem: 1000 ms	Amostragem: 1000 ms	Amostragem: 1000 ms

Posteriormente à análise qualitativa, procedeu-se à execução de análises quantitativas, realizadas com feixes de diâmetro 5 μm (exceptuando carbonatos, para os quais se usaram diâmetros de 25 μm), 25 nA de corrente de emissão, 15 kV de potencial de aceleração e tempos de contagem de 20 s. A rotina de calibração da microssonda recorreu à análise de padrões metálicos e de minerais de composição conhecida (**Tabelas 5, 6, 7 e 8**).

V.1.2 Estimativa de erros

Os erros associados à determinação da massa total, em condições de óptimo polimento e ausência de degradação, são inferiores a 1%. Nas mesmas condições, a determinação da massa total para elementos maiores é inferior a 2%, enquanto que para elementos menores (representando mais de 0.1% da massa total) é inferior a 5%. Para elementos em quantidades traço (representando menos de 0.1% da massa total), a estimativa dos erros necessita de determinação posterior.

A determinação de carbono pode ser feita por leitura directa, ou pela diferença da massa total para 100%. No primeiro caso, o erro associado é elevado, podendo atingir 20% (embora tipicamente inferior a 10% da massa total), devido à metalização das lâminas com grafite; determinações mais precisas podem ser efectuadas recorrendo à metalização com ouro. No segundo caso, os erros estimados registam-se em menos de 5% nos carbonatos e menos de 20% quando o carbono é um elemento menor; contudo, só pode ser efectuada quando não estão presentes outros elementos que não podem ser medidos (H e Li) e quando se conhecem os estados de oxidação reais dos elementos de transição presentes.

A determinação da água é sempre efectuada por diferença da massa total para 100%, com erros estimados em menos 20% nas anfíbolas, menos de 15% nas micas e menos de 10% nas clorites e minerais do grupo da serpentina.

Na situação em que os elementos não são todos analisados, constituindo um total de massa inferior a 80%, os valores dos erros nos elementos medidos sofrem um incremento de até 5%.

Tabela 5. Condições de leitura/medição para fosfatos *s.l.*.

Element	Standart name	Mass (%)	ZAF Fac.	Z	A	F
1 P_2O_5	apatite.ast	42.2108	2.8358	3.4012	0.8294	1.0053
2 Na_2O	jadeite.ast	15.1000	5.5606	10.7467	0.5153	1.0041
3 MnO	bustamite.ast	24.3100	0.2625	0.2704	0.9706	1.0001
4 FeO	almandine.ast	23.2700	0.1990	0.2024	0.9830	1.0000
5 CaO	apatite.ast	55.6043	0.8890	0.9503	0.9355	1.0000
6 F	apatite.ast	3.7700	3.3213	21.5322	0.1543	1.0000
7 Cl	tugtupite.ast	100.0000	2.0072	2.1405	0.9377	1.0000
8 SrO	celestite.ast	56.2000	3.4080	4.3528	0.7792	1.0048
9 La_2O_3	monazite.ast	15.1300	0.4791	0.5161	0.9282	1.0000
10 Ce_2O_3	monazite.ast	36.0800	0.4302	0.4596	0.9360	1.0000
11 Nd_2O_3	monazite.ast	10.1500	0.3447	0.3637	0.9477	1.0000

Tabela 6: Condições de leitura/medição para pirocloro.

Element	Standart name	Mass (%)	ZAF Fac.	Z	A	F
1 CaO	apatite.ast	55.6043	0.8890	0.9503	0.9355	1.0000
2 P_2O_5	monazite.ast	27.7300	2.3638	3.8878	0.6079	1.0001
3 MnO	bustamite.ast	24.3100	0.2625	0.2704	0.9706	1.0001
4 FeO	almandine.ast	23.2700	0.1990	0.2024	0.9830	1.0000
5 Nb_2O_5	Cal-STD	143.0524	2.7797	3.4505	0.8056	1.0000
6 Na_2O	jadeite.ast	15.1000	5.5606	10.7467	0.5153	1.0041
7 La_2O_3	monazite.ast	15.1300	0.4791	0.5161	0.9282	1.0000
8 ThO_2	monazite.ast	4.3200	1.3261	1.6591	0.7993	1.0000
9 PbO	galena.ast	93.2876	2.7233	3.4515	0.7890	1.0000
10 F	apatite.ast	3.7700	3.3213	21.5322	0.1543	1.0000
11 Ce_2O_3	monazite.ast	36.0800	0.4302	0.4596	0.9360	1.0000
12 Pr_2O_3	monazite.ast	4.9200	0.3852	0.4091	0.9414	1.0000
13 TiO_2	rutile.ast	100.0000	0.5904	0.6060	0.9742	1.0000
14 SrO	celestine.ast	56.2000	3.4080	4.3528	0.7792	1.0048
15 Nd_2O_3	monazite.ast	10.1500	0.3447	0.3637	0.9477	1.0000
16 Sm_2O_3	Cal-STD	115.9628	0.3247	0.3428	0.9473	1.0000

Tabela 7. Condições de leitura/medição para óxidos *s.l.*.

Element	Standart name	Mass (%)	ZAF Fac.	Z	A	F
1 CaO	apatite.ast	55.6043	0.8890	0.9503	0.9355	1.0000
2 Na_2O	albite.ast	11.5900	5.5020	10.7239	0.5109	1.0041
3 MnO	bustamite.ast	24.3100	0.2625	0.2704	0.9706	1.0001
4 BaO	benitoite.ast	37.0800	0.5092	0.5389	0.9448	1.0000
5 TiO_2	rutile.ast	100.0000	0.5904	0.6060	0.9742	1.0000
6 Al_2O_3	plagioclase.ast	28.5300	4.2119	5.8530	0.7113	1.0116
7 SiO_2	almandine.ast	39.1900	2.8799	4.4824	0.6424	1.0001
8 Fe_2O_3	haematite.ast	100.0000	0.2140	0.2170	0.9864	1.0000
9 ZnO	willemite.ast	66.8900	0.0604	0.0609	0.9922	1.0000
10 MgO	periclase.ast	100.0000	5.4677	7.8316	0.6982	1.0000
11 Cr_2O_3	chromium_ox.ast	100.0000	0.3636	0.3706	0.9811	1.0000
12 V_2O_3	V_b_1 (metal)	147.1143	0.5082	0.5216	0.9741	1.0000

Tabela 8. Condições de leitura/medição para carbonatos.

Element	Standart name	Mass (%)	ZAF Fac.	Z	A	F
1 CaO	calcite.ast	55.9400	0.8973	0.9293	0.9656	1.0000
2 CO_2	calcite.ast	44.0400	19.7512	73.9085	0.2672	1.0000
3 MnO	bustamite.ast	24.3100	0.2625	0.2704	0.9706	1.0001
4 FeO	almandine.ast	23.2700	0.1990	0.2024	0.9830	1.0000
5 TiO_2	kaersutite.ast	5.0400	0.5416	0.5714	0.9406	1.0076
6 MgO	almandine.ast	10.7000	4.1909	8.0108	0.5200	1.0060
7 Ce_2O_3	monazite.ast	36.0800	0.4302	0.4596	0.9360	1.0000
8 Nd_2O_3	monazite.ast	10.1500	0.3447	0.3637	0.9477	1.0000
9 SrO	celestite.ast	118.2607	3.8317	5.0267	0.7623	1.0000
10 Na_2O	plagioclase.ast	4.3500	5.2182	10.7639	0.4827	1.0043
11 La_2O_3	monazite.ast	15.1300	0.4791	0.5161	0.9282	1.0000
12 BaO	barite.ast	65.4500	0.5346	0.5744	0.9307	1.0000

V.2 Sinopse da Análise de Química Mineral

As espinelas ferríferas (magnetites *s.l.*) manifestam relativa homogeneidade composicional, desviando-se pouco da composição ideal Fe_3O_4 (e.g. BL-P 14, BL-P 18 e BL-P 80), mostrando baixos conteúdos em MnO (conteúdos medianos de 0.11 wt%, 0.10 wt% e 0.36 wt% para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente) e TiO_2 (conteúdos medianos de 0.19 wt%, 0.02 wt% e 0.21 wt% para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente); o FeO regista conteúdos medianos de 89 wt%, 92 wt% e 93 wt% para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente. Porém, a meteorização intensa (nomeadamente nos *ferro-carbonatitos*) registada por muitos dos exemplares estudados conduz à formação de maghemite (+ hematite) (Beleque *et al.*, 2009b; Santos, 2010).

Os óxidos de titânio identificados nos *fenitos* (BL-P 64 e BL-P 67) apresentam composição que pouco se desvia da ideal (TiO_2), revelando quantidades traço de ferro (0.3 wt%) e cálcio (0.02 wt%) (Beleque *et al.*, 2009b; Santos, 2010).

Com excepção do quartzo, os silicatos representam uma componente acessória (localmente significativa) das rochas constituintes dos *cálcio-carbonatitos*, revelando-se, pelo contrário, fundamentais nos *fenitos dos subconjuntos NW* e *SE*. No primeiro caso (e.g. BL-P 1, 8, 17, 28) correspondem fundamentalmente a piroxenas do tipo aegirina-augite (BL-P 54) e feldspatos *s.l.* (variam entre $Ab_{58}Or_{42}$ e Ab_5Or_{95}, com predomínio de composições potássicas)**.** Nos *fenitos*, correspondem a agregados matriciais grosseiros de feldspato *s.l.*, os quais representam a fase silicatada predominante com composições potássicas (85.7 wt% ≤ Or ≤ 99.3 wt% e 0.7 wt% ≤ Ab ≤ 12.7 wt%. Localmente, estes últimos fazem-se acompanhar por piroxenas do tipo aegirina-augite, registando-se ainda a presença de albite (Beleque *et al.*, 2009b; Santos, 2010).

Os filossilicatos do grupo da clorite são raros, ocorrendo apenas num dos exemplares do *cálcio-carbonatitos* (BL-P 28); tratam-se de clorites ferro-magnesianas, apresentando em média, 24.96 wt% de FeO e 18.78 wt% de MgO correspondendo a 2.18 e 2.92 at. *p.u.f.*, respectivamente.

Regista-se ainda a presença local de micas potássicas nos *fenitos* (BL-P 63) e nos *ferro-carbonatitos* (BL-P 38); os resultados da microssonda mostram um silicato de magnésio e potássio, muito rico em flúor e ausência quase total em alumínio. A Associação Internacional de Mineralogia (IMA — *International Mineralogical Association*) (Rieder *et al.*, 1998), mostra a existência de várias micas sem Al, raras portanto; aproxima-se da teniolite com fórmula $KLiMg_2Si_4O_{10}F_2$ (Beleque *et al.*, 2009b; Santos, 2010).

Os carbonatos são o suporte da matriz, constituída essencialmente por calcite nos *ferro-carbonatitos* e localmente dolomite; nos *cálcio-carbonatitos* predomina também a calcite, sendo a dolomite significativa nos domínios mais externos (BL-P 8) ou de transição para o núcleo (BL-P 19); localmente ocorre anquerite. Nos *fenitos* prevalece também a calcite na matriz dos exemplares do *subconjunto NE* (Beleque *et al.*, 2009b; Santos, 2010).

V.3 Óxidos

V.3.1 Pirocloro

Os minerais do grupo do pirocloro são fases acessórias comuns nos carbonatitos e rochas alcalinas associadas (Sharygin *et al.*, 2009 e referências citadas). Compreendem uma série de óxidos com quantidades essenciais de Nb, Ta, ou Ti (Hogarth, 1977). São particularmente importantes como única fonte económica de Nb nos carbonatitos, podendo, no entanto, ocorrer outros minerais portadores de Nb em quantidade suficiente de modo a afectarem ou constituírem a fonte dominante (ferrocolumbite, fersmite, niocalite e wöhlerite) (Mariano, 1989). A estrutura de simetria cúbica (Fd3/m), definida por Gaertner (1930) e Brandenberger (1931), é tolerante na incorporação de um vasto número de catiões, pelo que diversos componentes podem ser sintetizados com base nesta estrutura (Hogarth, 1977 & Sharygin *et al.*, 2009). A variabilidade composicional dos minerais do grupo do pirocloro é descrita pela fórmula geral $A_{1-2}B_2O_6(O,OH,F)\cdot nH_2O$, onde a posição ***A*** é ocupada por catiões de raio iónico relativamente grande, igual ou superior a 1.0 Å (Ca, Na, K, Cs, Th, U, ETR, Y, Ba, Sr, Pb, Mg, Mn, Bi, Sb, Sn^{2+} e Fe^{2+}) e ***B*** por Nb, Ti, Ta, Zr, Hf, Fe^{3+}, Sn^{4+}, W, Si e Al (Sharygin *et al.*, 2009 & Vanderah *et al.*, 2005). De acordo com Hogarth (1977), a variação das proporções atómicas em Nb, Ta e Ti na posição ***B*** permite agrupar as 16 fases composicionais, listadas na **Tabela 9**, conhecidas em três subgrupos: (i) *subgrupo pirocloro* (Nb + Ta > 2Ti e Nb > Ta); (ii) *subgrupo microlite* (Nb + Ta > 2Ti e Ta ≥ Nb) e *subgrupo betafite* (2Ti ≥ Nb + Ta). O pirocloro foi descrito por Wöhler (1826), a microlite por Shepard (1835) e a betafite por Lacroix (1912b).

Tabela 9. Classificação dos minerais do grupo do pirocloro (adaptado de Hogarth, 1977).

Subgrupos definidos em função dos átomos de Nb, Ta, Ti em B			**Pirocloro Nb + Ta > 2Ti Nb > Ti**	**Microlite Nb + Ta > 2Ti Ta ≥ Nb**	**Betafite 2Ti ≥ Nb + Ta**
Espécies definidas pelos átomos em A K, Sn, Ba, ETR, Pb, Bi, U	Na+Ca, mas não outros catiões ***A*** >20% do total átomos ***A***		Pirocloro	Microlite	
	Um ou mais átomos ***A***, outros que não Na ou Ca, > 20% do total átomos ***A***	K	Kali-pirocloro		
		Sn		Estanho-microlite	
		Ba	Bario-pirocloro	Bario-microlite	
		ETR*	Ítrio-pirocloro (ΣY>Ce)** Cerio-pirocloro (ΣCe>ΣY)		Ítrio-betafite (ΣY>ΣCe)
	Nome das espécies pelo átomo ***A*** mais abundante, que não seja Na ou Ca	Pb	Chumbo-pirocloro	Chumbo-microlite	Chumbo-betafite
		Bi		Bismuto-microlite	
		U	Urânio-pirocloro	Urânio-microlite	betafite
*ETR = Y + (La → Lu), e para as espécies definidas, ETR equivale a 1 átomo ***A*** ** ΣY = Y + (Gd → Lu); ΣCe = La + Eu					

Seguindo a estoiquiometria ideal $A_2B_2O_6$, os grupos de metais que preenchem as posições ***A*** e ***B*** dos pirocloros comuns surgem agrupados nas valências 3 e 4 (betafites) ou nas valências 2 e 5 (microlites). No entanto, tal como acontece em outros grupos minerais (e.g. espinelas), os metais constituintes do pirocloro podem ocorrer nas 4 valências aludidas e em quantidades variáveis. Mais uma vez, seguindo a estoiquiometria ideal, cargas positivas de $(3\times2)+(4\times2)=14+$ ou $(2\times2)+(5\times2)=14+$, implicam *C* = O^{2-} ou, eventualmente, S^{2-}. Em todos os casos em que *C* = (OH, F, Cl), a variação de cargas terá de ser compensada por um mecanismo que reduza a carga positiva da estrutura, tal como a introdução de Ti ou Si em ***B*** ou a incorporação de ETR em ***A*** num pirocloro com catiões de valência 2+ na posição ***A*** e 5+ na posição ***B***, abrindo lacunas em ***A***. No entanto, o número de 14 cargas positivas por unidade de fórmula pode ainda baixar mais através de mecanismos como a protonação da estrutura para lá do limite *C*, ou seja transformando em OH alguns dos O e, consequentemente, conduzindo a lacunas tanto catiónicas como aniónicas nos lugares ***A*** e ***C***, aproximando a composição global da que caracteriza um óxido mais simples (TiO_2 ou Nb_2O_5 no limite) ou da que é tipificada por B_2O_6 (Vanderah *et al.*, 2005).

Os pirocloros inclusos nas amostras de *ferro-carbonatitos* e alguns de *cálcio-carbonatitos* deverão apresentar uma estrutura cúbica de composição caracterizada por B_2O_6, visto apresentarem na posição ***A*** lacunas catiónicas, cifrando-se o total de ***A*** no intervalo aproximado [0.4 – 0.7].

Um total de 117 análises realizadas na microssonda electrónica foram efectuadas aos cristais de pirocloro constituintes das litologias de Bailundo, correspondendo 51 aos *cálcio-carbonatitos*, 18 aos *ferro-carbonatitos* e 48 aos *fenitos*. Mudanças durante os processos de alteração hidrotermal e supergénicos mantêm estáveis os conteúdos na posição ***B***, ocorrendo pelo contrário vazios de ocupação na posição ***A*** ou substituição dos catiões (Na e Ca) por Ba, U-Th, Sr

e ETR (Bambi *et al.*, 2008). Por este facto, todas as distribuições catiónicas por unidade de fórmula foram calculadas na base fixa de 2 catiões na posição ***B*** (Anexo III, Tabelas 1 e 2).

Os resultados obtidos revelam a presença de dois conjuntos principais composicionalmente distintos, titano-niobatos de Ca (Anexo III, Tabela 1) e titano-niobatos de Ba (Anexo III, Tabela 2). Os pirocloros enriquecidos em Ba (Ba-pirocloros) são característica distintiva dos *ferro-carbonatitos* (BL-P 37) e exemplares do sector NW dos *cálcio-carbonatitos* (BL-P 1) com valores medianos de 19.16 wt% e 14.11 wt%, respectivamente; os pirocloros caracterizados por elevado conteúdo em Ca e ausência de Ba são identificados nos *fenitos do subconjunto NE* (BL-P 31) e no segmento SE dos *cálcio-carbonatitos* (BL-P 39) (Beleque *et al.*, 2009c).

Os conteúdos medianos em CaO nos *fenitos* e *cálcio-carbonatitos* cifram-se em 17.2 wt% e para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos NW* os conteúdos revelam-se vestigiais com valores de 0.02 wt% e 0.01 wt%, respectivamente. De destacar os conteúdos em Na_2O, Th_2O e F significativamente mais elevados nos *fenitos* (6.1, 1.9 e 3.7 wt%, respectivamente) que nas restantes litologias onde se apresentam vestigiais, exceptuando o F no segmento SE dos *cálcio-carbonatitos* que atinge valores máximos de 2.4 wt% (valor mediano de 1.7 wt%) (Beleque *et al.*, 2009c).

Os pirocloros dos *ferro-carbonatitos* são mais ricos em TiO_2 (5.6 wt%), Ce_2O_3 (1.3 wt%) e La_2O_3 (0.2 wt%); no segmento NW dos *cálcio-carbonatitos*, os pirocloros revelam enriquecimento em SiO_2 (1.2 wt%), ZrO_2 (1 wt%) e Fe_2O_3 (0.6 wt%), enquanto o segmento SE apresenta concentrações mais elevadas em Nb_2O_5 (70.1 wt%), SrO (1.1 wt%) e PbO (0.9 wt%); ainda neste último são identificados Pb-pirocloros com valores máximos de PbO a atingirem 50.7 wt% (Anexo III, Tabela 1). Para os fenitos e *ferro-carbonatitos* as concentrações medianas em Nb_2O_5 cifram-se em 65 wt% e 67.6 wt%, respectivamente (Beleque *et al.*, 2009c).

Para todas as litologias regista-se ausência ou quantidades vestigiais de Ta (*ferro-carbonatitos* e alguns exemplares dos *cálcio-carbonatitos*), para além de quantidades menores ou traço de ETR representados apenas pelos ETRL (La – Sm). Os valores totais de ETR_2O_3 variam entre 0.41 a 7.78 wt% (*cálcio-carbonatitos SE*), 0.8 a 1.97 wt% (*cálcio-carbonatitos NW*), 1 a 4.28 wt% (*ferro-carbonatitos*) e 0.5 a 2.2 wt% (*fenitos*). Os conteúdos em ETRL cifram-se em 0.72 wt%, 1.13 wt%, e 1.05 wt% e 1.57 wt% para os *cálcio-carbonatitos SE*, *fenitos NE*, *cálcio-carbonatitos NW* e *ferro-carbonatitos*, respectivamente, destacando-se o Ce como elemento predominante. Em nenhum dos exemplares se regista a presença de Y, e as concentrações em Th são baixas, tomando valores medianos de 0.13, 1.87, 0.06 e 0.10 wt% para os *cálcio-carbonatitos SE*, *fenitos NE*, *cálcio-carbonatitos NW* e *ferro-carbonatitos*, respectivamente (Beleque *et al.*, 2009c).

V.3.2 Cerianite

A cerianite [$(Ce^{4+},Th)O_2$], um dos minerais de ETR mais raros, foi identificada pela primeira vez por Graham (1955) em amostras provenientes de Lachner Township, distrito de Subdury,

Ontário (Canada) e desde então não mais de 20 ocorrências fiáveis deste mineral (maioritariamente grãos microscópicos e micro-inclusões em outros minerais) têm sido documentadas (Graham, 1955 & Skublov *et al.*, 2009). Exemplos de outras ocorrências são os depósitos de Poço de Caldas (Minas Gerais, Brasil) e Karonge (República de Burundi) (Van Wambeke, 1977). Para além dos conteúdos muito elevados em Ce, contém outros ETRL (La, Pr, Nd), assim como outros elementos (Xe, Cs, Pb e Rh, em particular) e quantidades significativas de Th (Skublov *et al*., 2009). Apesar de conter outros ETR, o Ce^{4+} predomina claramente sobre os restantes, consequência das limitações em termos de substituição do mesmo por outros ETR devido às diferenças de raio iónico; as razões Ce:La aproximam-se de 16:1; ocorrências canadianas revelam ≈ 80 wt% de CeO_2 e apenas ≈ 4.5 wt% para os restantes ETR (Graham, 1955 *in* Clark, 1984).

Na amostra BL-P 26 dos *ferro-carbonatitos*, duas das análises químicas pontuais correspondem a cerianite cujos constituintes principais são o Ce_2O_3, ThO_2 e Gd_2O_3, apresentando conteúdos medianos de 56.3, 18.3 e 5.7 wt% (i.e. 0.59, 0.12 e 0.05 átomos *p.u.f.*). Estas análises dizem respeito a grãos isolados na matriz com dimensão reduzida e que parecem ser o resultado da alteração de um grão mineral pré-existente cujas características são impossíveis de determinar.

A distribuição catiónica, com base na fórmula geral, (Anexo III, Tabela 3) foi normalizada para 1 catião; contudo, a razão M:O não é exactamente 1:2, mercê da presença de Ce^{3+} em vez de Ce^{4+} como é descrito na literatura, muito embora as quantidades detectadas de P_2O_5 aparentam revelar-se determinantes no balanço eléctrico da estrutura.

Os resultados obtidos permitem evidenciar quantidades significativas de ETR (64.4 wt% correspondendo a 0.7 átomos *p.u.f.*), nomeadamente em ETRL, com conteúdos de 58.3 wt% (i.e. 0.6 átomos *p.u.f.*) e predomínio claro do Ce com 56.3 wt%. Os ETRP[1] apresentam conteúdos significativamente inferiores e os valores medianos respectivos cifram-se em 6.1 wt% (equivalente a 0.06 átomos *p.u.f.*); o Gd é o ETRP mais abundante, em média com 5.7 wt% (Beleque *et al.*, 2009c).

V.4 Fosfatos

V.4.1 Apatite

A apatite é o fosfato natural mais abundante na litosfera e, consequentemente, a maior fonte de fósforo (Hughes *et al.*, 2002). É um constituinte menor mas comum em diversas rochas ígneas; a sua presença deve-se não só à baixa solubilidade em *melts* e soluções aquosas, mas também à dificuldade em incorporar o fósforo na estrutura dos minerais comuns constituintes da rocha (Piccoli & Candela, 2002).

[1] Note-se que neste capítulo ETRP inclui as ETRI.

A apatite é especialmente abundante em exemplares dos subconjuntos *feníticos NE* e *SE*, associando-se possivelmente a fenómenos tardi-magmáticos síncronos da consolidação do corpo ígneo e da fenitização. A composição deste fosfato é descrita pela fórmula geral $\boldsymbol{A}_{10}(\boldsymbol{T}O_4)_6(OH, F, Cl)_2$ (Seifert *et al.*, 2000), onde a posição ***A*** é preferencialmente ocupada por catiões grandes como, Ca^{2+}, Sr^{2+}, Pb^{2+}, Ba^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+}, REE^{3+}, Eu^{2+}, Cd^{2+}, Y^{3+}, e Na^{+} (Pan & Fleet, 2002) e a posição ***T*** é ocupada preferencialmente por P^{5+} (como PO_4^{3+}), podendo acomodar outros catiões como Si^{4+}, S^{6+}, As^{5+}, V^{5+} e, por vezes, C^{4+} (Piccoli & Candela, 2002; Seifert *et al.*, 2000).

As 93 análises pontuais de apatite (Anexo III, Tabela 4) foram realizadas em amostras representativas dos *fenitos* (BL-P31, BL-P 32 e BL-P51), bem como em um exemplar dos *cálcio-carbonatitos* (BL-P28), e a repartição dos catiões *p.u.f.* determinada na base de 24 oxigénios; os cálculos realizados foram normalizados para 10 catiões de acordo com a estoiquiometria ideal descrita no parágrafo anterior.

Os resultados obtidos permitem concluir que se tratam de (flúor-)apatites com conteúdos em F variáveis entre 1.53 e 4.81 wt%; a apreciação cuidada das distribuições de valores revela ainda que as apatites inclusas nos *fenitos NE* esboçam tendência para maior enriquecimento em flúor (a mediana cifra-se neste caso em 3.38 wt%, contrastando com os valores medianos de 2.20 e 2.27 wt% apresentados pelas apatites nos *fenitos SE* e *cálcio-carbonatitos*, respectivamente). Os principais elementos menores identificados nas apatites analisadas correspondem a Sr e Fe; as distribuições de concentração em SrO apresentam medianas de 0.4 wt% nos *fenitos NE*, cifrando-se em 0.34 wt% nos *fenitos SE* e em 0.29 wt% nos *cálcio-carbonatitos*; os conteúdos em FeO são tendencialmente mais baixos (< 0.05 wt%), muito embora esporadicamente possam atingir valores da ordem de 2 a 4 wt% em qualquer contexto litológico (Beleque *et al.*, 2009b).

Nas apatites analisadas não se regista a presença de Y e os ETR (La, Ce e Nd) ocorrem em quantidades traço; o Cl é vestigial. Em conjunto, os conteúdos em ETR_2O_3 (= La_2O_3 + Ce_2O_3 + Nd_2O_3) situam-se abaixo de 1.13 wt%, correspondendo a (La+Ce+Nd) < 0.07 *p.u.f.* Tendencialmente, as apatites observadas nos *cálcio-carbonatitos* e *fenitos SE* apresentam maiores teores em ETR_2O_3 (valores medianos de 0.84 wt% e 0.80 wt%, contrastando com os manifestados pelas apatites presentes nos *fenitos NE*, os quais se cifram em 0.40 wt%) (Beleque *et al.*, 2009b).

V.4.2 Minerais do Grupo da Rabdofanite

As fases fosfatadas secundárias são relativamente frequentes nas litologias constituintes do CCB e, algumas delas, constituem fonte primordial de ETR. Apresentam-se em anexo os resultados de 50 análises pontuais de fosfatos hidratados de ETR obtidas nos exemplares BL-P34 e BL-P43 do *ferro-carbonatitos*, num total de 21 e 29 análises pontuais, respectivamente. Estes resultados confirmam as determinações qualitativas realizadas previamente, documentando a presença de fases secundárias ricas em ETR pertencentes ao grupo da rabdofanite

[(Ce,La)$PO_4.H_2O$], ou seja minerais secundários comuns resultantes da meteorização de bastnäsite (Ce,La)$(CO_3)F$, belovite [$NaSr_3$(Ce,La)$(PO_4)_3$(F,OH)], britolite [Ca_2(Ce,Y,Ca)$_3$.[(Si,P)O_4]$_3$(OH,F)], steenstrupine [(Ce,La,Na,Mn)$_6$(Si, P)$_6O_{18}$OH] e outros minerais de ETR (Clark, 1984). Ocorrências equivalentes são relatadas em Cornwall (Reino Unido), Connecticut (EUA) e Karonge (República de Burundi) (Van Wambeke, 1977).

Todos os membros do grupo da rabdofanite apresentam fórmula geral ***A***$PO_4.H_2O$, onde a posição ***A*** é preferencialmente ocupada por Ca^{2+}, Ce^{3+}, Pb^{2+}, La^{3+}, Nd^{3+}, Th^{4+}, Fe^{3+} e U^{4+}; o P pode ser parcialmente substituído por S ou Si. Análises representativas das 50 análises pontuais encontram-se na Tabela 5 (Anexo III), assim como a respectiva distribuição catiónica recorrendo à normalização para 1 catião de acordo com a composição ideal. A relação estequiométrica M:P (M = metal) das fases analisadas aproxima-se de 1:1, registando-se deficiência em fósforo que, apenas em parte, é compensada pelo silício.

A apreciação cuidada dos resultados analíticos obtidos revela conteúdos significativos em ETR variáveis entre 21.2 e 61.2 wt%, correspondendo 0.1 a 0.8 átomos *p.u.f.* (valores medianos de 47.6 wt%, i.e. 0.6 átomos *p.u.f.*) com predomínio dos ETRL em relação aos ETRP; os fosfatos constituintes da amostra BL-P 34 apresentam valores medianos em ETR ligeiramente mais elevados que os registados pelas fases congéneres na amostra BL-P 43 com 47.8 wt% (0.6 átomos *p.u.f.*) e 43.2 wt% (0.6 átomos *p.u.f.*), respectivamente. Os conteúdos em ETRL (= La_2O_3 + Ce_2O_3 + Pr_2O_3 + Nd_2O_3 + Sm_2O_3) variam entre 19.5 e 55.7 wt%, correspondendo a 0.1 e 0.8 átomos *p.u.f.* de La + Ce + Pr + Nd + Sm. A maior concentração em ETRL deve-se ao La_2O_3, Ce_2O_3 e Nd_2O_3, cifrando-se o total (La_2O_3 + Ce_2O_3 + Nd_2O_3) no intervalo compreendido entre 17.6 e 45.6 wt%, ou seja 0.1 e 0.6 átomos *p.u.f.*. O Ce_2O_3 e o Nd_2O_3 são os ETRL mais abundantes com conteúdos variáveis entre 3.6 e 24.1 wt% (0.05 e 0.33 átomos *p.u.f.*) e entre 0.6 a 25 wt% (0.004 e 0.4 átomos *p.u.f.*), respectivamente; para os dois óxidos, os valores medianos cifram-se em 13.4 wt% (0.2 átomos *p.u.f.*) e 8.5 wt% (0.1 átomos *p.u.f.*), pela mesma ordem. O La_2O_3 apresenta conteúdos variáveis entre 3 e 11 wt% (0.02 e 0.16 átomos *p.u.f.*) com valores medianos de 9 wt% (0.1 átomos *p.u.f.*). Os conteúdos em ETRP variam entre 0.8 e 5.5 wt%; o Gd é o ETRP mais abundante com concentrações variáveis entre 0.06 e 3.3 wt%, o que corresponde a 0.001 e 0.041 átomos *p.u.f.*, respectivamente. Regista-se a presença de ThO_2 e Y_2O_3, com conteúdos significativos de 5.88 wt% e 1.31 wt%, respectivamente (Beleque *et al.*, 2009c).

Os fosfatos com maior enriquecimento em Ce_2O_3 encontram-se na amostra BL-P43, sendo possível proceder à sua classificação como Ce-rabdofanites [i.e., (Ce,La)$PO_4.H_2O$]. Na amostra BL-P34 predominam os fosfatos ricos em Nd_2O_3 (relativamente a Ce_2O_3 e La_2O_3), pelo que é lícito classificá-las como Nd-rabdofanites [i.e., (Nd,Ce,La)$PO_4.H_2O$]. Na amostra BL-P43, as composições obtidas denunciam a possibilidade de ocorrência de brockite (mineral do grupo da

rabdofanite; fosfato de Ca, Th e Ce) e titano-rabdofanite com valores médios de TiO_2 a atingirem 28.16 wt% (Beleque *et al.*, 2009c).

Os fosfatos analisados na amostra BL-P 34 representam agregados que selam um veio tardio; a granularidade fina e morfologia em espícula atestam o seu carácter tardio. Juntamente com estes fosfatos reconhecem-se grãos de pirocloro com morfologia xenomórfica, contendo quantidades menores ou traço em ETR (conteúdos totais variáveis entre 1 e 4.3 wt% que contrastam fortemente com as apresentadas pelos fosfatos coexistentes, as quais se distribuem no intervalo compreendido entre 21.2 e 61.2 wt% e sugerem incorporação preferencial dos ETR nas últimas fases minerais, eventualmente num estádio precoce do desenvolvimento do veio). Na amostra BL-P43 os fosfatos surgem com granularidade muito fina e preenchem (sem nenhuma outra fase mineral associada) micro-venulações anastomosadas que cortam indiscriminadamente a rocha *ferro-carbonatítica* (Beleque *et al.*, 2009c).

Nas mesmas amostras foram realizadas mais 17 análises, sendo que apenas 1 corresponde ao exemplar BL-P 34. Os resultados obtidos (Anexo III, Tabela 6) revelam a presença de intercrescimentos finos entre fosfatos e titano-fosfatos de ETR, (hidr)óxidos de Fe e carbonatos matriciais diversos (calcite, dolomite e anquerite). Os conteúdos em ETR_2O_3 são significativos e cifram-se em 14.45 wt%, com predomínio das ETRL com 12.09 wt%, sobre as ETRP com 1.23 wt%. O Ce_2O_3 é o ETR mais abundante com conteúdos medianos de 3.81 wt%. O CaO, FeO, MgO, P_2O_5, TiO_2, ThO_2, e SrO também apresentam conteúdos apreciáveis. Os conteúdos em P_2O_5 (4.74 wt%) e TiO_2 (4.83 wt%) revelam-se determinantes na inferência de fases titano-fosfatadas de ETR, (possível titano-rabdofanite) na constituição de alguns dos intercrescimentos, os quais manifestam ainda quantidades significativas de ThO_2 (1.53 wt%), SrO (1.61 wt%) e Nb_2O_5 (0.75 wt%). Os conteúdos em Y_2O_3 são baixos, cifrando-se o valor mediano em 0.12 wt% (Beleque *et al.*, 2009c).

V.5 Flúor-Carbonatos

Os flúor-carbonatos de ETR têm merecido especial atenção por parte dos mineralogistas devido à sua importância económica, estrutura cristalina complexa e frequentes intercrescimentos epitáxicos entre fases, isto é, crescimentos ou sobre-crescimentos orientados de um cristal sobre outro pré-existente (Xueming *et al.*, 1998). Mariano (1989) demonstrou que os intercrescimentos não são o único modo de ocorrência, encontrando-se também fases puras (Ni *et al.*, 1993). Estes minerais são relativamente abundantes nos complexos alcalino-carbonatíticos, onde a bastnäsite ocupa particular destaque, sendo considerado o mineral de ETR mais abundante, consequência da sua abundância em depósitos como Mountain Pass, Califórnia (31 Mt de minério bastnäsite) e Bayan Obo, China (37 Mt) (Ni *et al.*, 1993). As características mineralógicas dos flúor-carbonatos e tipologia das mineralizações, constituem, não só, um guia importante para exploração,

processamento mineral e aplicações industriais, como também fornecem pistas sobre a origem do depósito (Xueming *et al.*, 1998).

Os primeiros estudos sobre flúor-carbonatos de ETR foram realizados por Oftdel (1931a, 1931b) (Ni *et al.*, 2000). Em 1953, Donnay e Donnay descrevem as relações cristalográficas entre a bastnäsite, parisite, synchysite e röntgenite, minerais do grupo dos flúor-carbonatos de Ca. Estes autores observaram que os intercrescimentos são comuns em todos os flúor-carbonatos de Ca, até mesmo nos cristais euédricos que, mais tarde, estudos de XRD (*X-ray Diffraction Data*) e TRM (*Transmission Electron Microscopy*) confirmaram. A existência dos intercrescimentos nos flúor-carbonatos de ETR permite a existência de domínios de diferente composição, entre a bastnäsite e synchysite ou bastnäsite e parisite (Ni *et al.*, 2000 e referências citadas).

A *bastnäsite* [$CeF(CO_3)$], de simetria hexagonal e grupo espacial $P\bar{6}2c$, possui uma estrutura em folha composta por duas camadas, uma camada CeF e outra CO_3, onde o Ce se encontra em coordenação irregular com oito O e três F (Burt, 1989 e referências citadas; Ni *et al.,* 1993). Os restantes flúor-carbonatos apresentam uma estrutura idêntica, no entanto com camadas intercaladas de $CaCO_3$ (Burt, 1989 e referências citadas). A *parisite* ($2CeF[Ca(CO_3)_3]$), de grupo espacial *Cc*, apresenta estrutura monoclínica, com duas camadas do tipo bastnäsite conectadas por uma camada $CaCO_3$ num padrão de empilhamento BBCBBC… (B indica as camadas em folha do tipo bastnäsite e C a camada $CaCO_3$) (Burt, 1989 e referências citadas; Ni *et al.*, 2000). A estrutura da *synchysite* ($CeF[Ca(CO_3)_2]$), de simetria monoclínica e grupo espacial C2/c, possui um padrão de empilhamento BCBC…, isto é, duas camadas CeF intercaladas com uma camada $CaCO_3$, (Burt, 1989 e referências citadas; Wang *et al.*, 1994). Por último, a *röntgenite* ($3CeF[Ca_2(CO_3)_5]$), de grupo espacial *R3*, apresenta estrutura trigonal com padrão de empilhamento BBCBCBBCBC…, isto é, com duas porções de bastnäsite, $CeF(CO_3)_2$ e $CeF_2(CO_3)_3$. Para todas as fases, a razão Ce:F é de 1:1; estas diferem, no entanto, quanto ao conteúdo da camada $CaCO_3$ (exceptuando a bastnäsite que não apresenta Ca), manifestando razões Ca:ETR que se cifram em 1:2, 1:1 e 2:3 para a parisite, synchysite e röntgenite, respectivamente (Burt, 1989; Ni *et al*., 1993).

A semelhança estrutural entre as fases (bastnäsite, parisite, synchysite e röntgenite) é a razão aparente para a existência dos intercrescimentos. As camadas CeF e CO_3 em comum, favorecem o desenvolvimento da superfície de crescimento (0001), na qual podem ser acomodadas mudanças composicionais que dão origem aos intercrescimentos (Ni *et al.,* 1993).

Visando a caracterização composicional das fases flúor-carbonatadas efectuaram-se 32 análises em amostras representativas dos *cálcio-carbonatitos* (BL-P 27, BL-P 39 e BL-P 53).

A observação petrográfica dos flúor-carbonatos não foi tarefa fácil, mercê da granularidade muito fina dos intercrescimentos, acrescida da sobreposição de efeitos devidos aos processos de

silicificação e meteorização química. Estes factores condicionaram também a obtenção de análises químicas fidedignas destas fases minerais, com consequente determinação da sua estoiquiometria. Apenas em 6 análises efectuadas (amostras BL-P 27 e BL-P39) foi possível determinar uma composição que permite a identificação fidedigna da fase mineral, neste caso a parisite. De acordo com a estoiquiometria ideal $\boldsymbol{AB}_2(CO_3)F_2$, a repartição dos catiões *p.u.f.* foi determinada na base de 2 catiões na posição ***B***, onde a posição ***A*** é ocupada preferencialmente por Ca^{2+} e ***B*** por ETR (Anexo III, Tabela 7). As análises revelam conteúdos médios em ETR_2O_3 de 44.8 wt%, dominando os ETRL relativamente aos ETRP com 43.9 wt% e 0.76 wt%, respectivamente. O Ce é o elemento preponderante, seguido do La, Nd, Pr e Sm; os conteúdos medianos em Ce_2O_3, La_2O_3, Nd_2O_3, Pr_2O_3 e Sm_2O_3 cifram-se em 23.55 wt%, 11.40 wt%, 4.73%, 3.25 wt% e 0.74, respectivamente. A concentração em CaO é elevada cifrando-se em 9.24 wt%, assim como noutros elementos com conteúdos médios em F, ThO_2, SrO, Y_2O_3 e FeO de 7.01 wt%, 1.71 wt%, 1.27 wt%, 0.71 wt% e 1.28 wt%, respectivamente. Para o FeO, os valores de concentração podem ser influenciados pelos gradientes químicos locais decorrentes da alteração das espinelas magnetíticas adjacentes (em particular nas amostras BL-P 27 e BL-P 39) (Beleque *et al.*, 2009c).

As restantes análises não permitiram a identificação fidedigna da fase mineral face às dificuldades encontradas na observação petrográfica, já descritas. Os resultados obtidos permitiram detectar intercrescimentos finos e complexos entre flúor-carbonatos de ETR, bastnäsite, synchysite e parisite (BL-P 39 — Anexo III, Tabela 8) e, entre estes e outras fases minerais não portadoras de ETR como (hidr)óxidos de Fe (BL-P 27, BL-P 39 e BL-P 53 — Anexo III, Tabela 9), óxidos de Mn e Ba, romanechite (BL-P 53 — Anexo III, Tabela 10) e carbonato de Ba, witherite e/ou barite (BL-P 39 — Anexo III, Tabela 11) (Beleque *et al.*, 2009c).

Todos os intercrescimentos mostraram conteúdos significativos em ETR_2O_3 cifrando-se em 46.19 wt%, 44.92 wt%, 28.94 wt% e 3.59 wt%, respectivamente, seguindo a ordem apresentada no parágrafo anterior, com largo predomínio das ETRL (44.96 wt%, 43.88 wt%, 26 wt% e 3.37 wt%, respectivamente) sobre as ETRP (1.29 wt%, 0.71 wt%, 3 wt% e 0.21 wt%, respectivamente). Dos ETRL o Ce_2O_3 é o mais abundante, apresentando conteúdos medianos de 22.71 wt%, 22.54 wt%, 13.70 wt% e 3.37 wt%. Acresce referir que no caso dos intercrescimentos entre flúor-carbonatos de ETR e carbonato de Ba apenas se dispõe de uma análise. Somente se registaram conteúdos em Y_2O_3 nos intercrescimentos entre flúor-carbonatos (bastnäsite, synchysite e parisite) com conteúdos medianos inferiores à unidade de 0.65 wt%. O CaO, FeO e F manifestam conteúdos significativos na maioria dos intercrescimentos, em especial nos flúor-carbonatos onde os valores medianos, perfazem 11.28, 0.33 e 6.44 wt%, respectivamente. No caso dos intercrescimentos envolvendo flúor-carbonatos e (hidr)óxidos Fe, os valores medianos naqueles óxidos cifram-se em 9.59 wt%, 8.70 wt% e 6.48 wt%, pela mesma ordem. Na presença de intercrescimentos entre hidróxidos de Mn e flúor-carbonatados, as concentrações médias em CaO, FeO e F atingem 8.42, 2.36 e 3.44 wt%, respectivamente. Por último, os intercrescimentos com fases baríticas/witheríticas

apresentam quantidades vestigiais nos constituintes em questão; note-se o predomínio do Ba (56.94 wt%). Acresce, por fim, referir o ThO_2, o qual apresenta concentrações medianas de 1.42 wt% nos intercrescimentos entre flúor-carbonatos ETR e misturas de (hidr)óxidos Fe (Beleque *et al.*, 2009c).

CAPÍTULO VI
CARACTERIZAÇÃO LITOGEOQUÍMICA

VI.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a caracterização da variação química global admitida pelas unidades constituintes do CCB: *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*. Para tal, um total de 50 amostras, de entre as 81 colhidas pela Genius Mineira Lda., foram seleccionadas tendo como base critérios de representatividade litológica e distribuição espacial, correspondendo 15 aos *ferro-carbonatitos*, 14 aos *cálcio-carbonatitos* e 21 aos *fenitos*. A **Figura 12** ilustra o posicionamento das amostras seleccionadas para análise química de rocha total. No âmbito deste trabalho será dada especial atenção à apresentação e discussão específica das distribuições de concentração em ETR obtidas para as três unidades representativas do CCB.

Os exemplares colhidos pela Genius Mineira Lda., apresentam dimensão reduzida, pelo que durante os procedimentos de preparação das amostras para análise química foi garantido a cada passo a menor perda possível de massa. A preparação das amostras seguiu o procedimento habitual, tendo a partição grosseira sido realizada com o auxílio de um martelo convencional e moinho de maxilas; no uso do martelo, as amostras foram devidamente protegidas de modo a evitar contaminações. Em certos exemplares, ao contrário do que é habitual, manteve-se a capa de alteração, visto esta poder apresentar fases minerais de interesse económico. A pulverização das amostras foi realizada em moinhos de argolas de ágata ou carboreto de tungsténio, escolhidos em função da quantidade de material disponível após partição grosseira; para massas inferiores a 120 g (cinco exemplares), quantidade mínima admitida para moagem nos moinhos de argolas, recorreu-se ao moinho de pilão.

As análises de rocha total multi-elementares foram requeridas ao Activation Laboratories Ltd. (Actlabs) no Canadá, tendo sido seleccionado o pacote analítico 4LITHORESEARCH, permitindo analisar a totalidade dos óxidos de elementos maiores e um largo conjunto de elementos menores e traço com limites de detecção adequados ao presente estudo (Tabela 10); detalhes sobre as condições de análise podem ser obtidas em http://www.actlabs.com/gg_rock_litho_usa.htm. Determinações adicionais (4LITHORESEARCHQUANT) ou melhoria dos limites de detecção para alguns elementos químicos em certos exemplares (nomeadamente os que representam minérios) foram solicitadas em função das características mineralógicas das amostras seleccionadas para estudo geoquímico; à listagem de elementos apresentada na **Tabela 10** acresce o CO_2 total.

Tabela 10. Limites de detecção, de acordo com a informação disponibilizada pelo Actlabs Lda.; concentrações em ppm excepto quando indicado em contrário.

WRA + trace (4LithoResearch)			
Al_2O_3	0.01%		
CaO	0.01%		
Fe_2O_3	0.01%		
K_2O	0.01%		
MgO	0.01%		
MnO	0.001%		
Na_2O	0.01%		
P_2O_5	0.01%		
SiO_2	0.01%		
TiO_2	0.001%		
LOI	0.01%		
Ag	0.5	**Sn**	1
As	5 (0.5++)	**Sr**	2
Au	(2 ppb++)	**Ta**	0.01
Ba	3	**Th**	0.05
Be	1	**Tl**	0.05
Bi	0.1	**U**	0.01
Br	(0.5++)	**V**	5
Cd	(0.5+)	**W**	0.5
Co	1	**Y**	0.5
Cr	20 (5++)	**Zn**	30 (1+)
Cs	0.1	**Zr**	1
Cu	10 (1+)	**La**	0.05
Ga	1	**Ce**	0.05
Ge	0.5	**Pr**	0.01
Hf	0.1	**Nd**	0.05
In	0.1	**Sm**	0.01
Ir	(5 ppb++)	**Eu**	0.005
Mo	2	**Gd**	0.01
Nb	0.2	**Tb**	0.01
Ni	20 (1+)	**Dy**	0.01
Pb	5	**Ho**	0.01
Rb	1	**Er**	0.01
S	(100+)	**Tm**	0.005
Sb	0.2	**Yb**	0.01
Sc	1 (0.1++)	**Lu**	0.002
Se	(3++)		

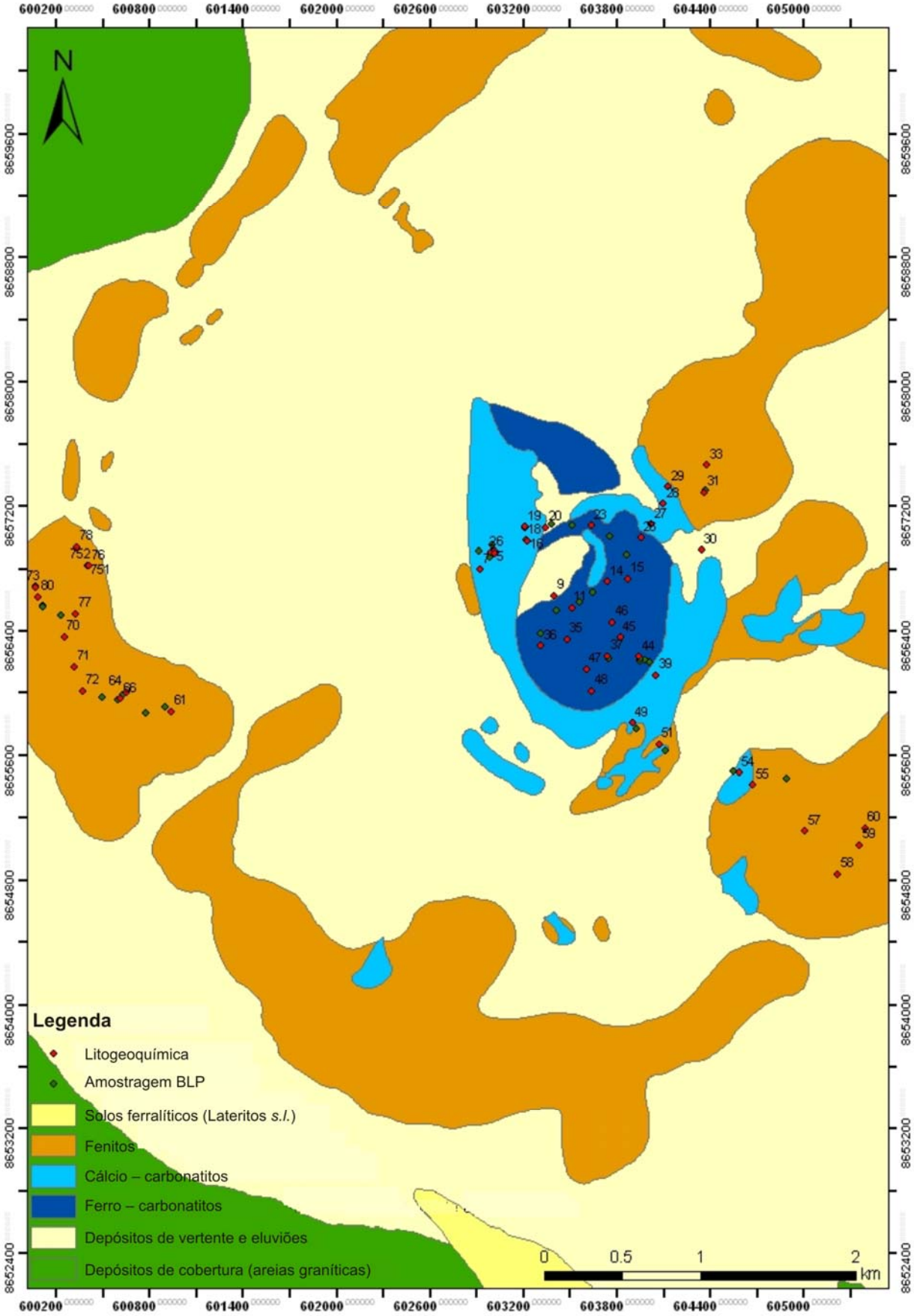


Figura 12. Localização dos exemplares seleccionados para análise química de rocha total.

VI.2 Caracterização geoquímica do Complexo Carbonatítico de Bailundo

VI.2.1 Elementos Maiores

Análises representativas dos resultados analíticos obtidos constam da Tabela I (Anexo IV). De acordo com as proporções relativas dos conteúdos em CaO, MgO e FeO + Fe_2O_3 + MnO, Woolley & Kempe (1989) (**Figura 13**) discriminam quimicamente os carbonatitos em *cálcio-carbonatitos*, em situações em que predomina o CaO em relação aos restantes componentes (> 80% CaO), *magnésio-carbonatitos* quando MgO > FeO + Fe_2O_3 + MnO e *ferro-carbonatitos* na presença de FeO + Fe_2O_3 + MnO > MgO. As fases carbonatadas dominantes para os três casos são a calcite, dolomite e anquerite, respectivamente.

Os carbonatitos de Bailundo são classificáveis como *cálcio-carbonatitos* e, na sua maioria, *ferro-carbonatitos* (**Figura 13**). A assinatura composicional dos *ferro-carbonatitos* traduz o enriquecimento relativo em espinelas ferríferas (magnetite *s.l.*) e produtos resultantes da sua alteração, conforme observado petrograficamente; a maioria dos exemplares projectados (BL-P 9, BL-P 11, BL-P 14, BL-P 15, BL-P 20, BL-P 23, BL-P 26, BL-P 35, BL-P 37, BL-P 46 e BL-P 47) apresentam concentrações em [FeO^T + MnO] acima de 38.44 wt%, cifrando-se a mais alta em 72.76 wt% (BL-P 37). As restantes amostras representam excepções a esta tendência geral, traduzidas por assinaturas cálcio-carbonatitícas (BL-P 48, contendo 49.27 wt% CaO) e dolomítico/anqueríticas, compreendendo quantidades acessórias de óxidos de ferro e manganês (concentrações em MgO que se cifram em 3.14 e 9.96 wt% para BL-P 45 e BL-P 36, respectivamente, e em [FeO^T + MnO] que atingem 11.19 wt% para BL-P 44 e 24.90 wt% BL-P 36; Santos *et al.*, 2009b; Santos, 2010).

Os exemplares representativos dos *cálcio-carbonatitos* (**Figura 13**) distribuem-se de forma heterogénea no diagrama [CaO-MgO-(FeO^T+MnO)], mantendo, no entanto, tendência para o enriquecimento em [FeO^T + MnO] como resultado da disseminação de (hidr)óxidos de ferro e manganês (conforme observado em BL-P 5, BL-P 6 e BL-P 49, para as quais se obtém 9.5, 8.9 e 4.8 wt% de [FeO^T + MnO], respectivamente). As amostras BL-P 28, BL-P 30 e BL-P 39 são *cálcio-carbonatitos* com conteúdos elevados em CaO (51.89, 50.27 e 45.22 wt%, respectivamente), projectando-se a BL-P 27 (12.97 wt% MgO, 23.85 wt% CaO, 10.90 wt% [FeO^T + MnO]) e BL-P 29 (9.62 wt% MgO, 31.76 wt% CaO, 9.32 wt% [FeO^T + MnO]) no campo magnesiano, próximo da fronteira com os *ferro-carbonatitos* (Santos *et al.*, 2009b; Santos, 2010).

Os *fenitos* mostram enriquecimentos notórios em [FeO^T + MnO] (**Figura 13**), fruto das frequentes disseminações em (hidr)óxidos de ferro, pelo que tendem a sobrepor-se ao campo composicional *ferro-carbonatítico*; contudo, quando a intensidade da carbonatização é significativa, a composição desloca-se no sentido dos outros vértices em função da natureza química dos

carbonatos metassomáticos, como acontece com as amostras BL-P 51 (*Fenitos SE*) e BL-P 31 (*Fenitos NE*) (Santos *et al.*, 2009; Santos, 2010).

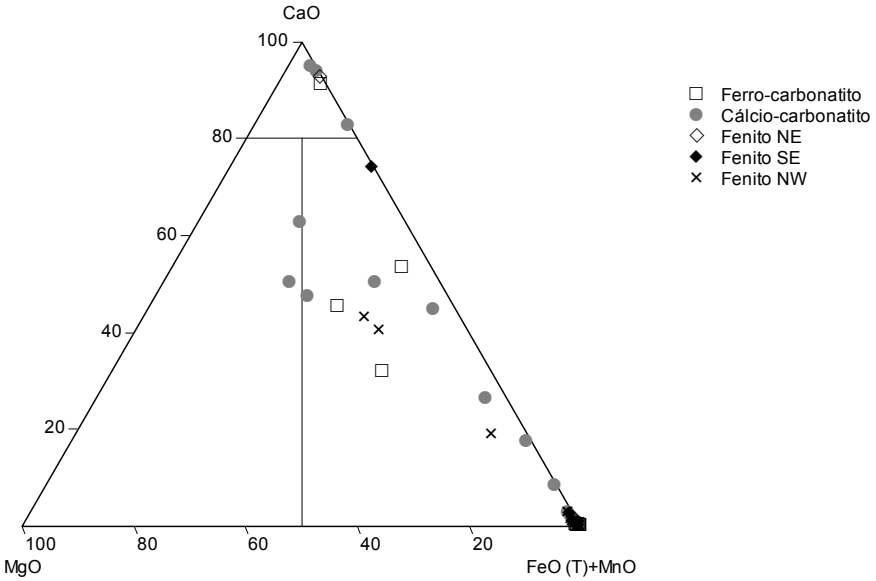


Figura 13. Composição dos carbonatitos do CCB e *fenitos* projectados no diagrama de Woolley & Kempe (1989) CaO – MgO – FeO + Fe_2O_3 + MnO (wt%).

A variabilidade química dos elementos maiores pode ser expressa através de diagramas bivariados do tipo Harker onde, cada um dos elementos (% em peso de óxidos) é projectado contra outro elemento que possa ser utilizado como índice de diferenciação magmática (ID) (Rollinson, 1993; Wilson, 1989), que deve apresentar um espectro de variação elevado. A SiO_2 e o MgO são os óxidos normalmente seleccionados como ID. Contudo, no que diz respeito às rochas carbonatíticas, estes dois elementos não são os usados. Na complexidade dos processos de evolução dos carbonatitos destaca-se uma nítida diferenciação química, onde é universalmente aceite que, os *cálcio-carbonatitos* são menos diferenciados e os *ferro-carbonatitos*, associados às fases terminais, são mais diferenciados. Assim, considera-se a razão CaO/(CaO + MgO + Fe_2O_3 + FeO + MnO) como ID com significado petrogenético, no âmbito da evolução magmática: *cálcio-carbonatitos* → *carbonatitos dolomíticos* → *ferro-carbonatitos* (*dolomíticos/anqueríticos*) → *carbonatitos sideríticos* (Issa Filho *et al.*, 1991; Lapido Loureiro, 1995). Na **Figura 14** apresentam-se os diagramas de variação para os principais elementos maiores e na **Tabela 11** uma sinopse dos valores de concentração admitidos pelos principais elementos.

Os valores de concentração obtidos revelam distribuições assimétricas, destacando-se as concentrações em CO_2 (≤ 39.60 wt%), CaO (≤ 51.89 wt%) e MgO (≤ 13.48 wt%), assim como os conteúdos em $Fe_2O_3^T$ (≤ 80.65 wt%), MnO (≤ 22.33 wt%) e TiO_2 (≤ 9.53 wt%) (**Tabela 11**). O CO_2, CaO e MgO mostram nítida correlação positiva com o ID (**Figura 14**), como seria de esperar, pois reflectem em boa medida a abundância relativa das fases carbonatadas (flúor-carbonatos e

carbonatos), nomeadamente para os *cálcio-carbonatitos* (em média com 19.42 wt%, 20.87 wt% e 3.35 wt% para o CO_2, CaO e MgO, respectivamente). Os *cálcio-carbonatitos* apresentam as maiores amplitudes de variação para o MgO, CaO e CO_2 com [0.04 – 13.48 wt%], [0.08 – 39.6 wt%] e [0.1 – 51.89 wt%], respectivamente. Os *Fenitos* mostram alguns valores mais elevados em CaO e CO_2 os quais correspondem às amostras com matriz carbonatada (BL-P 31 e BL-P 51).

Os conteúdos em $Fe_2O_3^T$, MnO e TiO_2, traduzem enriquecimentos em fases óxidas e hidróxidas diversas, conforme documentado para várias amostras. Desenvolvem uma correlação negativa com o ID, apesar da dispersão (**Figura 14**). Os maiores valores em $Fe_2O_3^T$ (80.65 wt%) e TiO_2 (9.53 wt%) são obtidos para os *ferro-carbonatitos*, em média com 53.38 wt% e 1.94 wt%, respectivamente, reflectindo a abundância relativa de espinelas ferríferas (magnetite *s.l.*). Para os *fenitos* é possível visualizar um comportamento semelhante para algumas amostras, denunciando menor abundância de (hidr)óxidos de Fe quando na matriz predominam fases carbonatas (calcite). As concentrações em MnO são mais baixas para todas as litologias; em média com 1.72 wt% e 1.01 wt% para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente. O $Fe_2O_3^T$, MnO e MgO (**Figura 14**) correlaciona-se negativamente com o ID, traduzindo quer o quimismo das espinelas, quer os processos de substituição Ca-Mg(Fe), imputáveis às transformações de dolomite → anquerite e anquerite → siderite.

Tabela 11. Principais características geoquímicas apresentadas pelas unidades litológicas constituintes do Complexo Carbonatítico de Bailundo; valores de concentração em wt%; *N* – número de amostras.

		CO_2	F	SiO_2	Al_2O_3	$Fe_2O_3^T$	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
Ferro-carbonatitos *N* =15	Mínimo	0.16	0.01	0.45	0.08	4.02	0.19	0.02	0.02	0.01	0.01	0.17	0.02
	Máximo	38.80	1.38	22.93	5.09	80.65	6.35	9.96	49.27	0.35	0.08	9.53	13.68
	Média	7.06	0.21	2.87	1.01	53.38	1.72	1.50	7.48	0.06	0.03	1.94	1.82
	Mediana	0.52	0.05	1.05	0.30	59.91	1.40	0.26	0.08	0.02	0.03	1.55	0.66
Cálcio-carbonatitos *N* =14	Mínimo	0.08	0.01	0.52	0.03	2.16	0.15	0.04	0.10	0.01	0.01	0.06	0.04
	Máximo	39.60	1.55	92.83	7.56	59.47	2.21	13.48	51.89	0.58	4.48	1.26	11.77
	Média	19.42	0.26	33.42	0.69	13.82	1.01	3.35	20.87	0.09	0.42	0.31	1.62
	Mediana	20.50	0.13	6.47	0.14	9.30	0.96	0.47	21.41	0.05	0.03	0.15	0.62
Fenitos *N* = 21	Mínimo	0.02	0.01	0.56	0.04	3.27	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03
	Máximo	37.80	0.32	92.13	13.73	66.97	22.3	9.72	50.59	5.00	11.4	1.22	4.37
	Média	6.69	0.10	46.65	4.58	19.73	1.86	1.01	6.93	0.44	4.32	0.41	0.65
	Mediana	0.21	0.09	59.28	0.57	13.30	0.27	0.06	0.07	0.11	0.06	0.20	0.32

Variações assinaláveis nos conteúdos em Al_2O_3 ($\leq$ 13.73 wt%) e K_2O ($\leq$ 11.35 wt%) ($\pm$ $Na_2O \leq$ 5.00 wt%) são compatíveis com alterações das proporções de ocorrência de feldspato. Estes três óxidos não mostram comportamento claro em função do ID. São representados pelas associações minerais potássico-sódicas ricas em feldpatos potássicos e piroxenas do tipo aegirina-

augite abundantes nos *fenitos*, constituindo na maioria das vezes o suporte da matriz (feldspatos potássicos). Assim se explicam as maiores concentrações nos *fenitos*: em média com 4.58 wt%, 4.32 wt% e 0.44 wt% de Al_2O_3, K_2O e Na_2O, respectivamente. Concentrações baixas nestes óxidos são notórias para os exemplares com maior concentração em CaO, onde os carbonatos são o suporte da matriz.

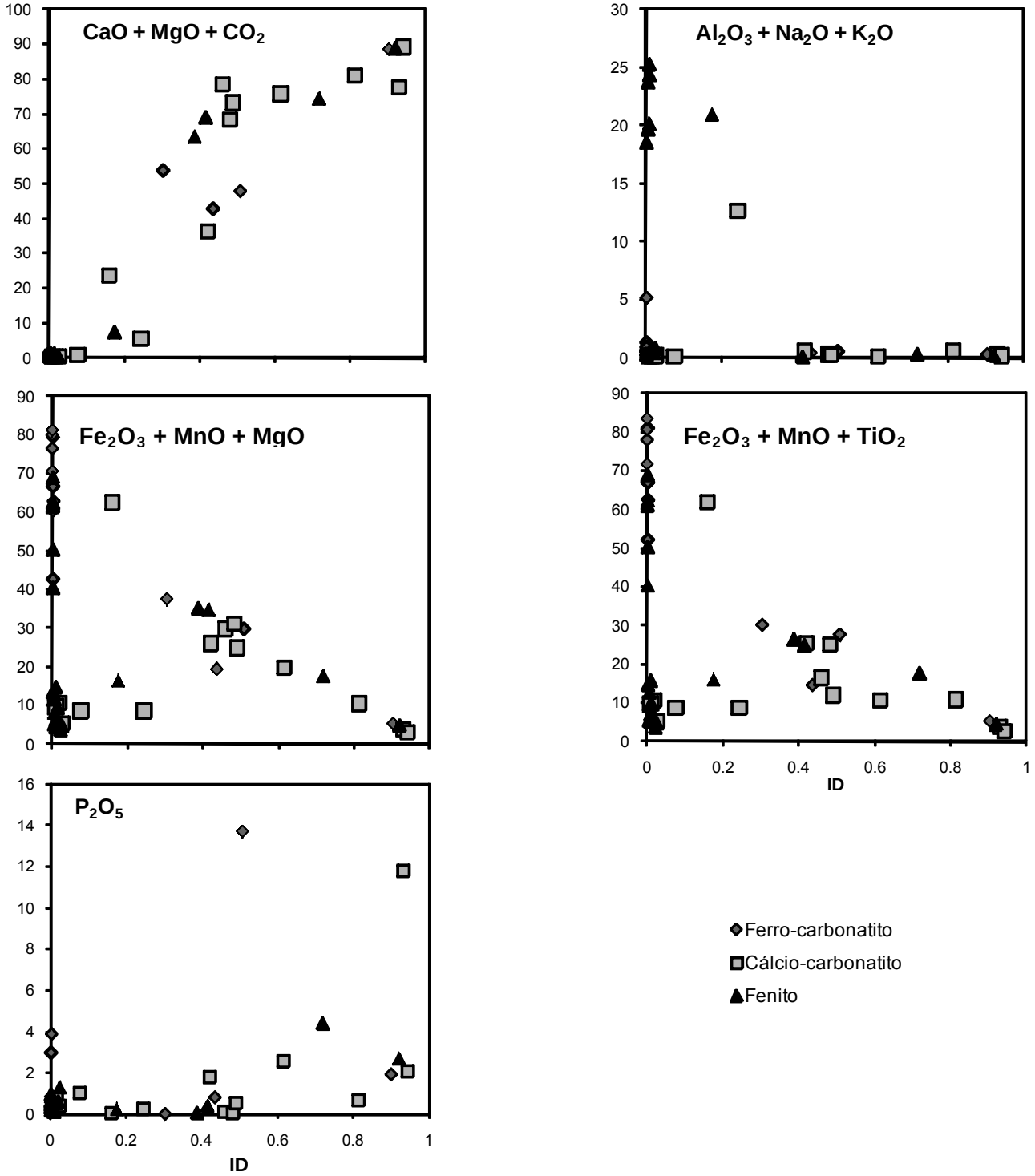


Figura 14. Diagramas de variação para ID = CaO/(CaO + MgO + $Fe_2O_3^T$ + MnO) *versus* os principais elementos maiores das litologias enquadrantes do CCB; concentrações em wt%.

Os teores em P_2O_5 (≤ 13.68 wt%) e F (≤ 1.55 wt%) denotam contribuições variáveis em fosfatos e flúor-carbonatos nomeadamente para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos* (em média com 1.82 wt% e 1.62 wt%, respectivamente). Este facto, embora não colocado em evidência na **Figura 14**, onde não se regista uma relação com o ID, é assinalado através de forte correlação com o F (r^2 = 0.92). Para os *cálcio-carbonatitos* o valor máximo obtido de 11.77 wt% documentando a ocorrência de apatite, assim como a maior contribuição em P nos *fenitos*.

VI.2.2 Elementos Incompatíveis

A análise multi-elementar dos elementos incompatíveis recorre da aplicação e consequente interpretação de dois tipos de diagramas multi-elementares, são eles os diagramas que utilizam os ETR e os designados *spider diagrams*. Considerados os elementos traço menos solúveis, as ETR são relativamente imóveis durante os processos de metamorfismo de baixo grau, meteorização e alteração hidrotermal (Rollinson, 1993). A pequena diferença de tamanho e comportamento é explorado por um número de processos petrológicos causando a fraccionação das ETR umas em relação às outras. Este fenómeno é usado em geoquímica para interpretar a génese das rochas e os processos petrogenéticos (Rollinson, 1993). Os *spider diagrams* são uma extensão aos diagramas de ETR normalizados relativamente ao condrito (ou a outro termo de referência), baseando-se na comparação de elementos incompatíveis. Estes elementos incompatíveis são subdivididos em dois subgrupos, atendendo ao potencial iónico (razão entre a carga e o raio dos catiões), os LILE (*Large Ion Lithophile Elements*), que são prontamente mobilizados na presença de uma fase fluida, e os HFSE (*High Field Strength Elements*) cuja concentração é controlada pela mineralogia e natureza da fonte que originou os magmas (Rollinson, 1993; Winter, 2001). Em ambos os diagramas, as concentrações são normalizadas a um padrão conhecido, tendo-se seleccionado para as ETR a normalização relativamente ao condrito (Palme & Jones, 2003) e, para os elementos incompatíveis, a normalização relativamente ao manto primitivo (Palme & O'Neill, 2003). Os valores de normalização encontram-se no Anexo IV, Tabelas 5 e 6. Nos diagramas de ETR, os elementos são projectados da esquerda para a direita segundo o número atómico; no caso dos *spider diagrams* o padrão de projecção segue a ordem de incompatibilidade dos elementos da direita para a esquerda. Com base na análise destes diagramas espera-se, ainda que de forma sumária, usar as características elementares das rochas carbonatíticas e feníticas como indicadores petrogenéticos, tentando desvendar a assinatura geoquímica da fonte e os processos de cristalização fraccionada, metassomáticos e/ou hidrotermais que possam ser responsáveis pela diversidade mineralógica característica destas rochas.

Elementos de Terras Raras (ETR)

As análises químicas de rocha total revelam conteúdos em ETR variáveis mostrando maiores concentrações em ETRL relativamente às ETRI e ETRP (**Tabela 12**). Os maiores

conteúdos em ETR são apresentados pelos *ferro-carbonatitos* ($\bar{x}$ = 1.15 wt%; 0.13 a 4.54 wt%) e *cálcio-carbonatitos* ($\bar{x}$ = 1.10 wt%; 0.21 a 2.96 wt%); os *fenitos* denotam valores significativamente mais baixos ($\bar{x}$ = 0.71 wt%; 0.11 a 2.58). As concentrações mais elevadas em ETRL são apresentadas pelo La e Ce que, nos *ferro-carbonatitos*, apresentam valores médios de 1506.64 ppm (0.35 wt% de La_2O_3) e 1969.07 ppm (0.46 wt% de Ce_2O_3) para La e Ce, respectivamente; para os *cálcio-carbonatitos* obtêm-se valores de La ($\bar{x}$ = 1248.71 ppm; $\bar{x}$ = 0.29 wt%) e Ce ($\bar{x}$ = 2241.14 ppm; $\bar{x}$ =0.52 wt%) e, para os *fenitos*, temos La ($\bar{x}$ = 649.52 ppm; $\bar{x}$ = 0.15 wt%) e Ce ($\bar{x}$ = 1348.19 ppm; $\bar{x}$ =0.32 wt%).

Tabela 12. Conteúdos em ETR para o CCB; valores em ppm, excepto para ETR_2O_3 cujo valor é expresso em wt %; *N* – número de amostras.

		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	*N*
Ferro-carbonatitos	Mínimo	142	258	26.5	69	12.1	3.48	8.28	0.93	4.97	*15*
	Máximo	8460	8410	593	1430	384	159	466	57.6	223	
	Média	1506.64	1969.07	224.52	752.71	145.31	45.85	123.33	16.14	72.32	
	Mediana	759	1050	182	677.5	143	45.2	105	11.9	54.95	
Cálcio-carbonatitos	Mínimo	262	434	45.7	119	20.1	5.09	11.5	1.4	6.6	*14*
	Máximo	4200	6530	521	1930	311	84.9	197	23.4	94.4	
	Média	1248.71	2241.14	230.53	705.36	110.56	29.66	71.92	8.77	39.15	
	Mediana	641.5	1140	131.5	472	78.25	19.1	47.75	6.51	32.1	
Fenitos	Mínimo	127	195	22.2	73.8	11.8	3.01	8.53	1.07	4.44	*21*
	Máximo	2820	4690	579	2250	337	89.2	218	28.7	120	
	Média	649.52	1348.19	164.19	628.16	100.86	25.26	59.61	6.84	29.42	
	Mediana	279	646	77.1	236	44.2	12.1	30.6	3.68	15.7	

Seguindo o La e Ce vem, em termos de abundâncias relativas, o Pr, Nd e Sm. Em relação às ETRI, os elementos mais abundantes são o Gd ($\bar{x}$ = 123.33 ppm; $\bar{x}$ = 0.03 wt%) e o Dy ($\bar{x}$ = 72.32 ppm; $\bar{x}$ = 0.02 wt%) para os *ferro-carbonatitos*; nos *cálcio-carbonatitos* obtêm-se Gd ($\bar{x}$ = 71.92 ppm; $\bar{x}$ = 0.02 wt%) e Dy ($\bar{x}$ = 39.15 ppm; $\bar{x}$ = 0.01 wt%) e, nos *fenitos*, temos Gd ($\bar{x}$ = 59.61 ppm; $\bar{x}$ = 0.01 wt%) e Dy ($\bar{x}$ = 29.42 ppm; $\bar{x}$ = 0.01 wt%). Dos ETRP, os elementos mais abundantes são o Er ($\bar{x}$ = 26.67 ppm; $\bar{x}$ = 0.01 wt%) e o Yb ($\bar{x}$ = 19.63 ppm; $\bar{x}$ = 0.004 wt%) para os *ferro-carbonatitos*; nos *cálcio-carbonatitos*, Er ($\bar{x}$ = 14.2 ppm; $\bar{x}$ = 0.003 wt%) e Yb ($\bar{x}$ = 9.24 ppm; $\bar{x}$ = 0.002 wt%) e, nos *fenitos*, Er ($\bar{x}$ = 10.66 ppm; $\bar{x}$ = 0.002 wt%) e Yb ($\bar{x}$ = 5.74 ppm; $\bar{x}$ = 0.001 wt%).

Tabela 12. (continuação).

		Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ETR	ETR_2O_3	*N*
Ferro-carbonatitos	Mínimo	0.83	2.08	0.268	1.58	0.194	541.74	0.13	*15*
	Máximo	36.6	104	16.3	110	15.8	19364.88	4.54	
	Média	11.49	26.67	3.32	19.63	2.50	4919.52	1.15	
	Mediana	8.06	19.75	2.07	11.05	1.27	2856.12	0.67	
Cálcio-carbonatitos	Mínimo	1.02	2.42	0.251	1.52	0.208	910.81	0.21	*14*
	Máximo	13.1	30.4	3.85	21.1	2.69	12643.78	2.96	
	Média	6.03	14.2	1.69	9.24	1.20	4718.17	1.10	
	Mediana	5.52	14.2	1.79	9.785	1.3	2533.35	0.59	
Fenitos	Mínimo	0.58	1.42	0.127	0.57	0.09	464.874	0.11	*21*
	Máximo	16.5	40.1	4.98	26.4	3.77	11048.58	2.58	
	Média	4.47	10.66	1.17	5.74	0.72	3034.80	0.71	
	Mediana	2.46	5.79	0.584	2.94	0.416	1395.37	0.33	

De forma a avaliar a abundância relativa de fases ricas em nióbio e titânio (e.g. pirocloro), ferro (magnetite), ETR e bário, projectaram-se as diferentes amostras no diagrama Nb-Ba-ETR [$(Nb_2O_5+TiO_2)$-(BaO+SrO+CaO+MgO)-ETR_2O_3] (**Figura 15**). Na análise destes diagramas será dada especial atenção às fases portadoras de ETR.

O diagrama Nb-Ba-ETR revela-se crucial na caracterização geoquímica das amostras de Bailundo na medida em que possibilita a discriminação dos domínios rochosos variavelmente enriquecidos em ETR, Nb_2O_5 e BaO, obtendo-se deste modo uma projecção heterogénea dos exemplares analisados caracterizada por enriquecimentos variáveis, por vezes marcantes, nos três componentes.

Para os *ferro-carbonatitos* os exemplares distribuem-se quase exclusivamente ao longo da faixa composicional que se estende entre os vértices (BaO+SrO+CaO+MgO) e $(Nb_2O_5+TiO_2)$, exceptuando a amostra BL-P 14 que apresenta maior proporção relativa em ETR_2O_3 (correspondendo ao valor absoluto de concentração de 2.45 wt%, o qual deverá reflectir a presença de minerais portadores de ETR na matriz que aglutina as massas de magnetite observadas). O enriquecimento em $(Nb_2O_5+TiO_2)$ e (BaO+SrO+CaO+MgO) afigura-se compatível com as observações petrográficas que denunciam a presença de pirocloro com diferentes composições, conforme verificado durante o trabalho analítico com microssonda electrónica: (*i*) titano-niobatos de Ca e (*ii*) titano-niobatos de Ba. Temos pirocloro euédrico disseminado na matriz (BL-P 37 e 45) ou pirocloro xenomórfico hidrotermal integrando os precipitados tardios que preenchem os filonetes/veios (BL-P 36). Deste grupo de amostras destaca-se ainda a BL-P 37 contendo Ba-pirocloro [conteúdos máximos em $(Nb_2O_5+TiO_2)$ de 4.65 wt%] e a BL-P 36 [conteúdos máximos em ETR_2O_3 de 4.54 wt%].

Para os exemplares dos *cálcio-carbonatitos* evidenciam-se dois grupos compisicionalmente distintos. O grupo mais próximo do vértice (BaO+SrO+CaO+MgO), integrando os exemplares BL-P 7, 16, 18, 19, 27, 28, 29, 30 e 39, apresenta valores dominantes daquele total, variando entre 14.8 wt% e 47.65 wt%; note-se que, neste caso, os óxidos dominantes são o MgO e o CaO com conteúdos comprendidos nos intervalos 0.19-13.48 wt% e 11.94-51.89 wt%, respectivamente; os conteúdos em (Nb_2O_5+TiO_2) oscilam entre 0.12 wt% e 2.04 wt%, confirmando as inferências realizadas com base na química mineral de que os pirocloros observados nas rochas constituintes dos *cálcio-carbonatitos* se caracterizam pela ausência de Ba (BL-P 39), excepto para a amostra BL-P 1 cujos pirocloros apresentam valores medianos de BaO de 14.11 wt%. Note-se que a BL-P 27, 39 e 16 apresentam conteúdos em ETR_2O_3 de 2.96 wt% e 1.23 wt%, respectivamente, confirmado pela presença de flúor-carbonatos (parisite) nas duas primeiras amostras com conteúdos medianos elevados em La_2O_3 (11.40 wt%) e Ce_2O_3 (23.55 wt%). A amostra BL-P 27 caracteriza-se pela presença de apatite, pelo que a sua projecção reflecte o elevado conteúdo em CaO e não em ETR_2O_3, cujos conteúdos em (La_2O_3, Ce_2O_3 e Nd_2O_3) se cifram em 0.84 wt%. O outro grupo de amostras (BL-P 2, 5, 6 e 49) apresenta forte tendência composicional em direcção ao vértice ETR_2O_3, não obstante os valores absolutos de concentração se distribuirem no intervalo 0.60-2.37 wt%, corroborando a importância das fases minerais flúor-carbonatadas observadas em petrografia, cujas análises de microssonda revelam Ba para além dos ETR.

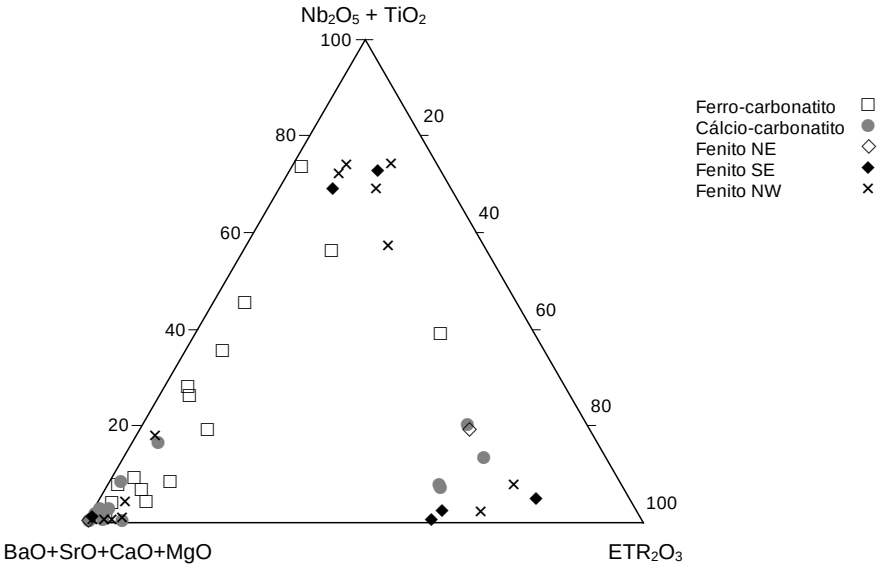


Figura 15. Projecção dos exemplares representativos do CCB no diagrama Nb-Ba-ETR.

As amostras representativas dos *fenitos* distribuem-se pelos três extremos composicionais. As projectadas junto ao vértice ETR_2O_3 apresentam teores absolutos nestes óxidos variáveis entre 1.1 e 2.6 wt%; o conteúdo elevado em BaO revelado pelas amostras BL-P 71, 80 e 81 explica a

razão pela qual estas se projectam próximo do vértice (BaO+SrO+CaO+MgO), exibindo valores absolutos de concentração para o somatório iguais a 18.3, 4.6 e 10.6 wt%, respectivamente. A amostra BL-P 31 caracteriza-se pela presença de pirocloro; contudo projecta-se junto ao vértice (BaO+SrO+CaO+MgO) pois este pirocloro não incorpora Ba e é rico em Nb_2O_5 e CaO; para além disso a matriz desta amostra é calcítica. As restantes amostras, na vizinhança do vértice (Nb_2O_5+TiO_2), evidenciam os maiores conteúdos em TiO_2 (1.1 e 1.2 wt% para BL-P 55 e BL-P 64), reflectindo fundamentalmente a abundância relativa de fases titanadas como a brookite ou anátase.

Padrões de concentração em ETR normalizados ao condrito

As distribuições de concentração em ETR normalizadas relativamente aos condritos (CN) encontram-se nas **Figuras 16 e 17** separadas por conjunto litológico: *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos* (por sua vez subdividido nos subconjuntos NW, NE e SE). Para todas as litologias, os dados obtidos confirmam as inferências realizadas com base nas informações de química mineral, demonstrando claro enriquecimento das ETRL relativamente às ETRP e ausência de anomalia do Eu, característica típica dos carbonatitos reconhecidos em todo o mundo (Yang *et al*., 2003 e referências citadas). Para os *ferro-carbonatitos* o enriquecimento em ETRL (35000 a ≈ 85 x CN) relativamente às ETRP (750 a 8 x CN) é maior que para os *cálcio-carbonatitos* e *fenitos* com enriquecimentos em ETRL de 20000 a ≈ 150 x CN e 7000 a 80 x CN, respectivamente, e em ETRP de 300 a 10 x CN e 300 a 4 x CN, pela mesma ordem.

Os *ferro-carbonatitos* denunciam padrões mais variáveis com declives negativos mais acentuados e transições, por vezes abruptas, dos ETRL para os ETRI-ETRP (**Figura 16 A**), facto que deveria tipificar maior fraccionação para este conjunto; no entanto se calcularmos o fraccionamento das ETRL em relação às ETRP através da razão $[La/Yb]_{CN}$, verifica-se ser maior para os *fenitos* em média com 119.06 [10.99 – 446.62] comparativamente aos *ferro-carbonatitos* com $[La/Yb]_{CN}$ = 78.75 [5.33 – 353.89] e aos *cálcio-carbonatitos* com $[La/Yb]_{CN}$ = 98.09 [21.64 – 237.70]. Como seria de esperar, a fraccionação das ETRL (razão La/Sm_{CN}) é sempre maior que a fraccionação das ETRP (razão Gd/Yb_{CN}), como pode ser observado na **Tabela 13**, excepto para os *fenitos* que apresentam comportamento contrário.

Tabela 13. Razões de ETR para as litologias do CCB dadas em $\bar{x}$ (min – Máx).

	$[La/Sm]_{CN}$	$[Gd/Yb]_{CN}$	$[La/Yb]_{CN}$	*N*
Ferro-carbonatitos	7.25 (0.57 - 37.71)	6.28 (1.03 - 12.95)	78.75 (5.33 - 353.89)	*15*
Cálcio-carbonatitos	7.71 (3.49 - 24.44)	6.62 (2.34 - 19.15)	98.09 (21.64 - 237.70)	*14*
Fenitos	4.95 (0.52 - 10.76)	10.19 (2.86 - 28.05)	119.06 (10.99 - 446.62)	*21*

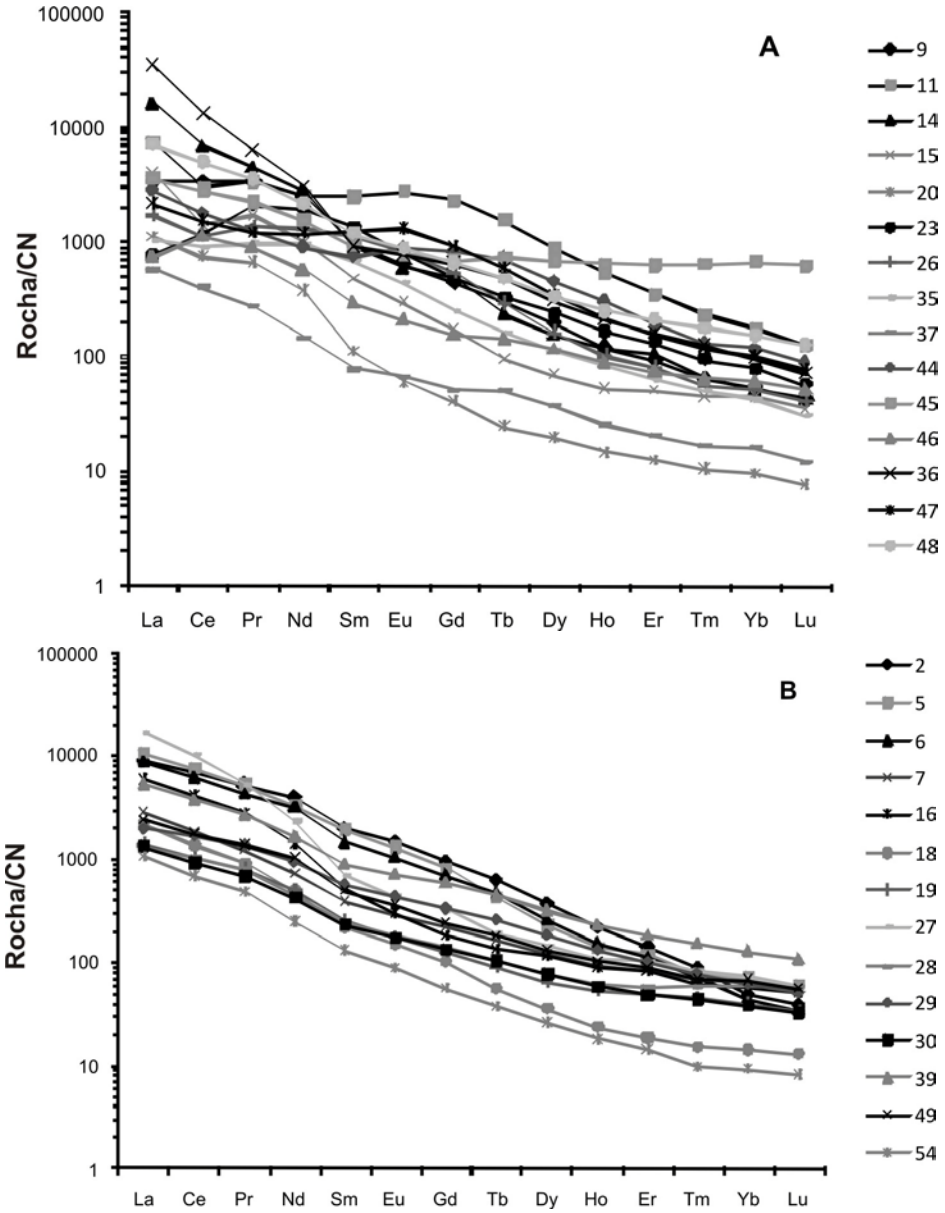


Figura 16. Padrões de ETR normalizados ao condrito (Palme & Jones, 2003) para os exemplares dos *ferro-carbonatitos* (A) e *cálcio-carbonatitos* (B).

O La é o ETRL mais abundante seguido do Ce para todas as litologias, exceptuando a amostra BL-P 46 dos *ferro-carbonatitos* e os exemplares BL-P 59 e 60 dos *fenitos* onde a relação inversa prevalece. Em particular, a amostra BL-P 26 e as amostras BL-P 46 e BL-P 60 denotam anomalias negativas e positivas em Ce, respectivamente, embora pouco pronunciadas; no caso da amostra BL-P 26 este comportamento denota a ocorrência de cerianite (óxido de Ce). A concentração em La_{CN} varia de 600 a 35000 x CN, 1000 a≈ 20000 x CN e 500 a 7000 x CN, para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente. Na amostra BL-P 23 (*ferro-carbonatitos*), os conteúdos em Nd e Pr são mais elevados que o La e Ce com 2000 x CN e ≈ 3000

x CN, respectivamente, registando-se algo de semelhante para os fenitos representados pelas amostras BL-P 71 e BL-P 81 (**Figura 17 A**). As concentrações em ETRI para os *ferro-carbonatitos*,

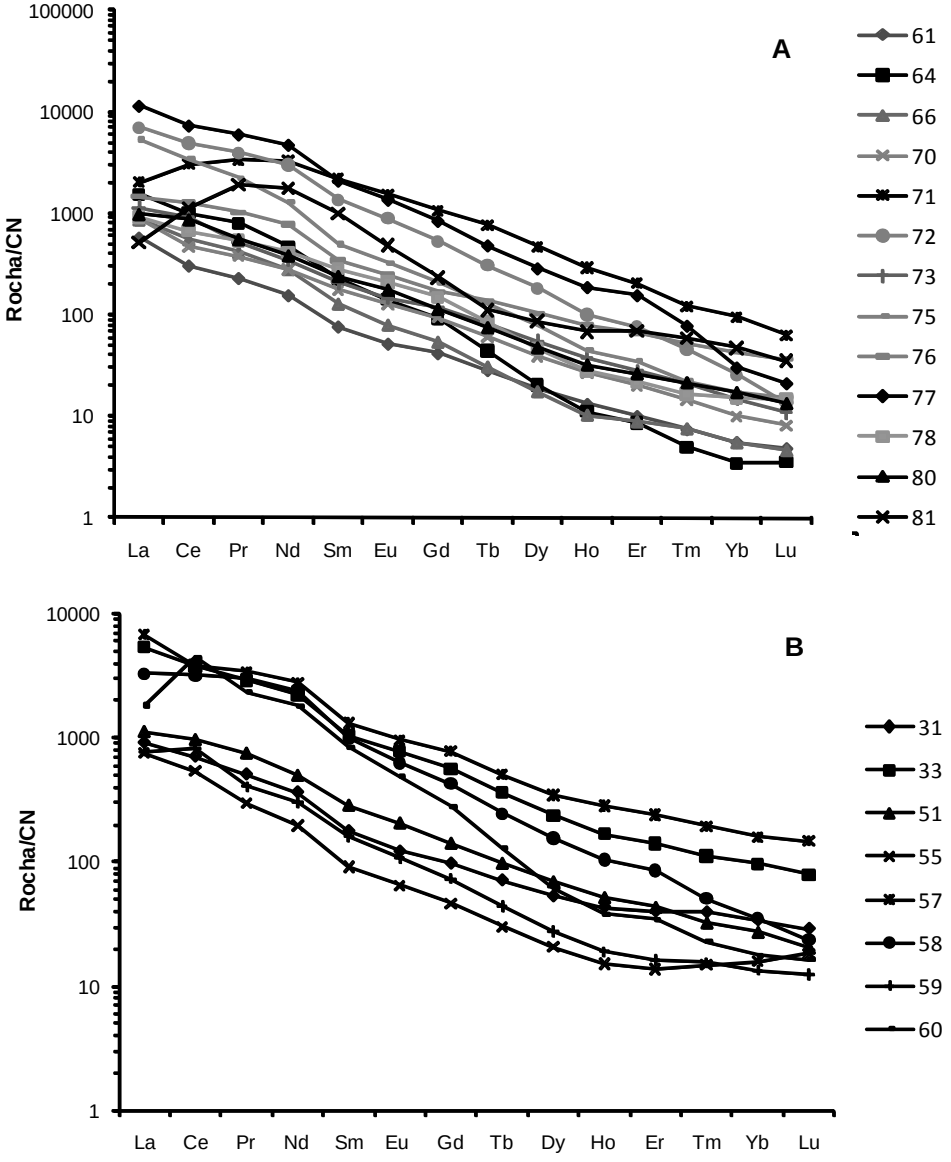


Figura 17. Padrões de ETR normalizados ao condrito (Palme & Jones, 2003) para os exemplares dos *fenitos NW* (A) e *fenitos NW e SE* (B).

cálcio-carbonatitos e *fenitos* cifram-se em 3000 a 20 x CN, ≈ 2000 a 30 x CN e 2000 a 20 x CN, respectivamente. Os maiores enriquecimentos em ETRI, conduzindo a padrões tendencialmente convexos, são observados nas amostras BL-P 11 e 47 dos *ferro-carbonatitos*, para as quais se obtiveram conteúdos máximos em Eu_{CN} de 3000 x CN e ≈ 1500 x CN, respectivamente, mas ainda assim inferiores aos conteúdos registados para o La_{CN}. Ainda nos *ferro-carbonatitos*, a amostra BL-P 45 desenha um padrão suavemente decrescente em direcção aos ETRI-ETRP com um factor mais ou menos constante de 800 x CN. As concentrações em ETRP para os *ferro-carbonatitos*,

cálcio-carbonatitos e *fenitos* cifram-se em 750 a 8 x CN, 300 a 10 x CN e 300 a 4 x CN, respectivamente, sendo o Ho o ETRP mais abundante.

Todos estes comportamentos são compatíveis com a distribuição e abundância relativa das fases portadoras de ETR observadas em petrografia, assim como a sua natureza composicional, avaliada com base em análises químicas pontuais. Os elevados teores em ETR e a pronunciada fraccionação ETRL/ETRP das rochas carbonatíticas parece estar relacionado com processos de natureza hidrotermal responsáveis pela formação das fases oxidas, fosfatadas e flúor-carbonatadas portadoras de ETR, eventualmente reforçada por efeitos (locais?) resultantes da meteorização química (conduzindo a enriquecimentos residuais). A origem destes minerais será discutida em detalhe no próximo capítulo.

Padrões de concentração multi-elementar normalizados ao manto primitivo (*Spider Diagrams*)

A distribuição dos elementos traço litófilos (ETR, Rb, Ba, Th, U, K, Nb, Ta, Sr, P, Zr, Hf, Ti e Y) normalizados relativamente ao manto primitivo (MP) encontra-se nas **Figuras 18** (*ferro-carbonatitos*), **19** (*cálcio-carbonatitos*) e **20** (*fenitos*), seguindo uma ordem crescente de grau de incompatibilidade da direita para a esquerda. Característica relevante para todas as litologias representativas do CCB (*ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*) corresponde aos padrões apiciformes para a maioria dos elementos incompatíveis (LILE e HFSE), contrastando com os últimos elementos projectados na zona direita do diagrama, correspondendo ao Y, ETRI (Tb) e ETRP (Yb e Lu) que denunciam padrões mais suaves.

A assinatura dos elementos mais incompatíveis ou LILE como o K, Ba e Rb é semelhante para todas as litologias mostrando elevados conteúdos em Ba, pronunciadas anomalias negativas em Rb, quando presente, e K. Os empobrecimentos em K são bem vincados para a maioria dos exemplares analisados, sendo a magnitude do decréscimo mais elevada para os *fenitos* na ordem de 200 a 0.20 x MP, relativamente aos factores determinados para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos* (≈ 1.5 a 0.20 x MP e 80 a ≈ 0.20 x MP, respectivamente). O enriquecimento em K dos *fenitos* denuncia a presença dos abundantes feldspatos potássicos matriciais, contrastando com a ausência dos mesmos para as restantes litologias. O Ba apresenta o maior grau de enriquecimento de entre os LILE na ordem de≈ 20000 x MP, 5000 x MP e ≈ 25000 x MP, para o s *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente. O forte enriquecimento em Ba deve-se às fases do grupo do pirocloro ricas em neste elemento com valores medianos que podem atingir 19.16 wt% (*ferro-carbonatitos*) e 14.11 wt% (*cálcio-carbonatitos*), para além da presença, menos acentuada, de barite em alguns exemplares (e.g. amostra BL-P 71 e 76 do *fenitos NW*). Processos de alteração hidrotermal podem ser responsáveis pela incorporação de tais quantidades de Ba em minerais como o pirocloro, uma vez que, sendo um LILE é um elemento facilmente remobilizado na

presença de fluidos. O Th e o U apresentam comportamento variável denotando anomalias positivas com algumas excepções. No caso do Th as excepções dizem respeito à amostra BL-P 80 (*fenitos NW*) enquanto que para o U o número de excepções é maior incluindo as amostras BL-P 15, 26, 23, 36 e 45 dos *ferro-carbonatitos*, BL-P 18, 19, 49, 54 e 27 dos *cálcio-carbonatitos* e, BL-P 31, 55, 66, 70, 71, 77, 76, 81, 73, 72 e 64 dos *fenitos*. Tal como o Ba, o Sr apresenta conteúdos elevados, ainda que significativamente mais baixos, similares aos valores evidenciados para os outros carbonatitos independentemente do local de origem (Nelson *et al*., 1998; Woolley *et al*., 1991 *in* Alberti, *et al*., 1999); os enriquecimentos máximos cifram-se em 1500 x MP (*ferro-carbonatitos*), 400 x MP (*cálcio- carbonatito*) e 300 x MP (*fenitos*).

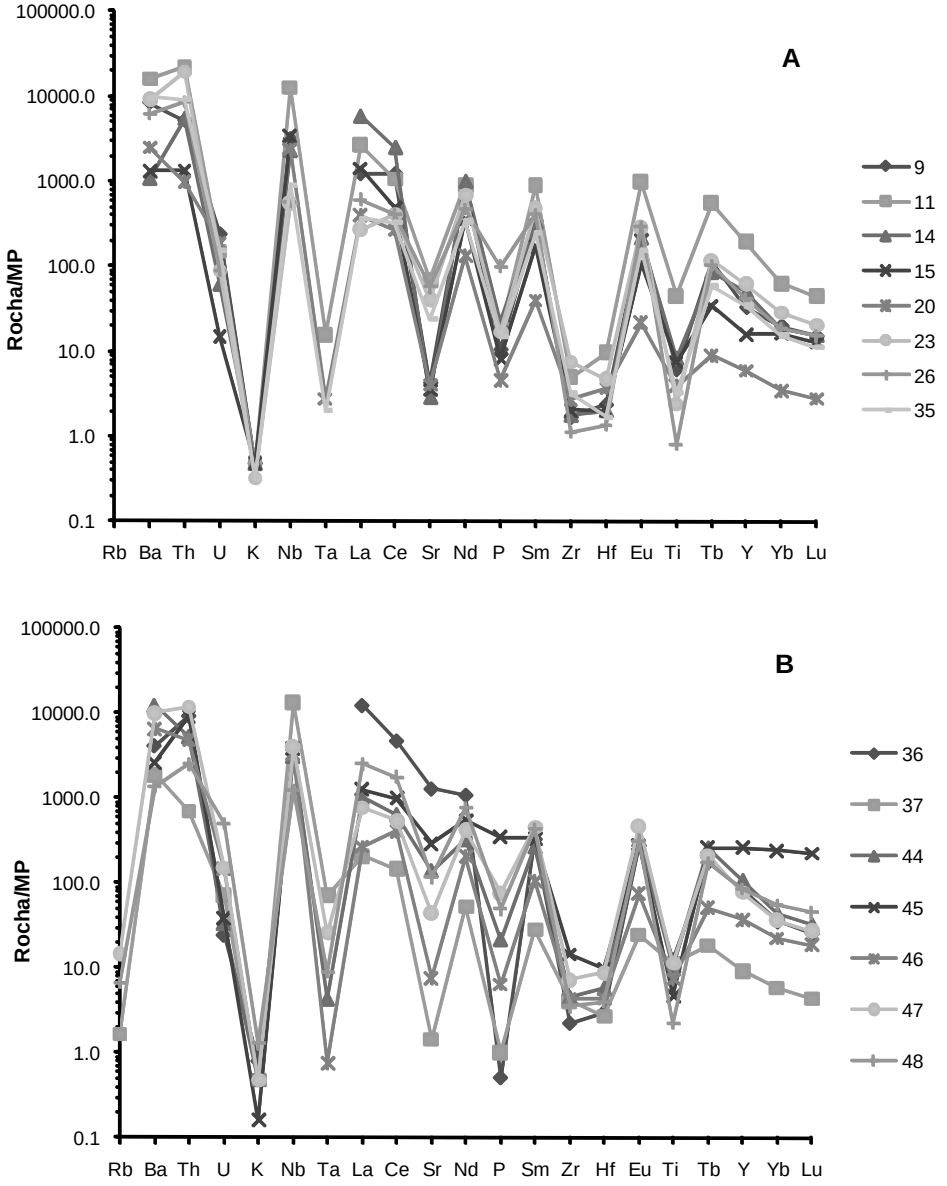


Figura 18. Padrões de concentração multi-elementar normalizados ao manto primitivo (Palme & O'Neill, 2003) para os exemplares do *Ferro-carbonatitos* (A e B). Nas legendas, os números abreviam a referência formal das amostras BL-P.

As distribuições de concentração global em Ba e Sr, revelam conteúdos ≤ 163000 ppm (i.e. 18.3 wt%) e ≤ 26000 ppm (i.e. 3.1 wt%), respectivamente (Santos *et al*., 2009b).

A assinatura dos elementos menos incompatíveis (HFSE) apresenta também comportamento similar para as três litologias. São característicos os conteúdos elevados em ETR, nomeadamente em ETRL; o La-Ce e Yb são os elementos mais abundantes do conjunto dos ETRL e ETRP, respectivamente. Os conteúdos em ETRL cifram-se em 10500 a 30 x MP (*ferro-carbonatitos*), 6000 a 50 x MP (*cálcio-carbonatitos*) e 5000 a 30 x MP (*fenitos*), enquanto os conteúdos em ETRP se cifram em ≈ 300 a 3 x MP (*ferro-carbonatitos*), 50 a 2 x MP (*cálcio-carbonatitos*) e 60 a ≈ 1.5 x MP (*fenitos*). O Eu é o ETRI mais abundante, com enriquecimentos máximos de 1000 x MP, 500 x MP e 600 x MP, para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente. Estes valores afiguram-se consistentes com a elevada fraccionação ETRL-ETRP evidenciada pelas concentrações de ETR normalizadas relativamente ao condrito. O P apresenta grau de incompatibilidade similar relativamente ao Nd durante a fusão mantélica (Sun & McDonough, 1989); contudo, todas as litologias apresentam abundâncias elementares muito diferentes, mostrando anomalias positivas bem marcadas para o Nd e negativas para o P. Este facto afigura-se plausível pela abundância de fases minerais portadoras de ETR incorporando com facilidade o Nd; o P, atendendo às suas características, marcará essencialmente à cristalização tardia de apatite e/ou fosfatos tardios (comuns em alguns exemplares).

Os HFSE Zr, Hf, Nb e Ta têm-se tornado ferramentas úteis no estudo dos processos geoquímicos no manto superior e na génese da crusta continental. Enriquecimentos e empobrecimentos destes elementos são usados desde há muito para caracterizar a fonte e evolução dos magmas mantélicos. Os pares de elementos Zr-Hf e Nb-Ta são quimicamente muito similares, sendo por isso esperado que se comportem de forma congruente nos fluidos e magmas (Weyer *et al.*, 2003 e referências citadas). O par Zr-Hf, assim como o Ta, P e Ti mostram anomalias negativas. Os valores médios da razão Zr/Hf (**Tabela 14**) cifram-se em 36.97 (*ferro-carbonatitos*), 59.02 (*cálcio-carbonatitos*) e 46.43 (*fenitos*), ligeiramente superior ao MP (36) (Sun & McDonough, 1989) para os *ferro-carbonatitos* e superior para as restantes litologias, nomeadamente para os *cálcio-carbonatitos*. Valores supra-mantélicos de Zr/Hf podem ser atribuídos a metassomatismo carbonatítico (Green, 1995 e referências citadas) congruente com a formação dos carbonatitos. O Zr é mais incompatível que o Hf, logo seria de esperar litologias mais diferenciadas caracterizadas por valores mais elevados da razão Zr/Hf, em função do aumento do grau de fraccionação do magma durante o qual ocorrerá um aumento mais rápido de Zr. No entanto, os *ferro-carbonatitos* (mais diferenciado) apresentam, em média, uma razão Zr/Hf mais baixa (36.97) que a definida para aos *cálcio-carbonatitos* (59.02) (**Tabela 14**) congruente com o valor médio de Zr (47.71 ppm) inferior em relação às restantes litologias [115.4 ppm nos *cálcio-carbonatitos* e 171.2 nos *fenitos*]; de notar que aquela razão elementar não só é mais baixa, como muito próxima do valor estipulado

para o MP com Zr/Hf = 36 (Sun & McDonough, 1989) (**Figura 21**); a ocorrência de uma contribuição magmática pode ser uma explicação plausível para este facto.

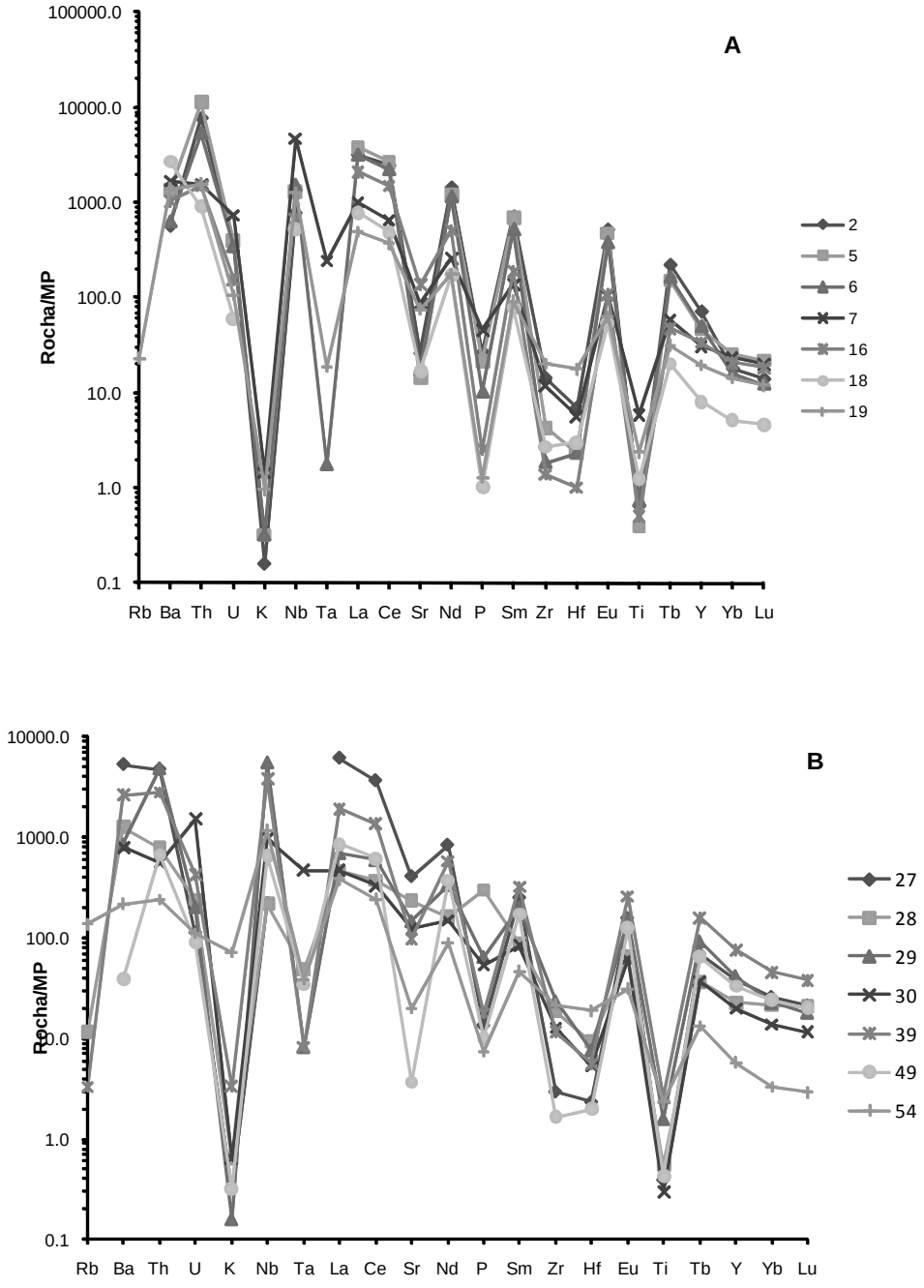


Figura 19. Padrões de concentração multi-elementar normalizados ao manto primitivo (Palme & O'Neill, 2003) para os exemplares dos *cálcio-carbonatitos* (A e B). Nas legendas, os números abreviam a referência formal das amostras BL-P.

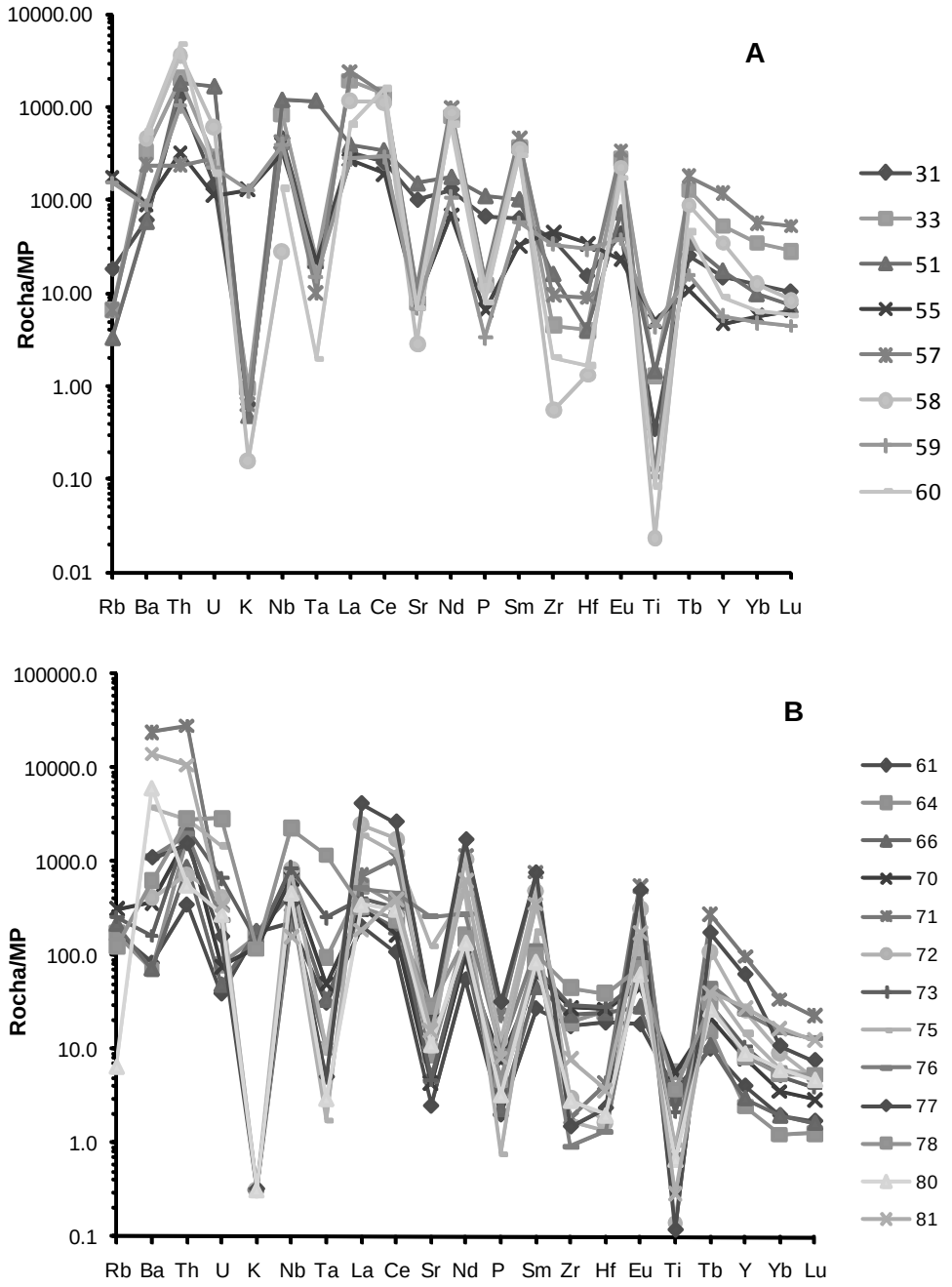


Figura 20. Padrões de concentração multi-elementar normalizados ao manto primitivo (Palme & O'Neill, 2003) para os exemplares dos *fenitos NE* e *SE* (A) e *fenitos NW* (B). Nas legendas, os números abreviam a referência formal das amostras BL-P.

Tabela 14. Razões de concentração em Nb/Ta e Zr/Hf para as litologias enquadrantes do CCB dadas em $\bar{x}$ (min-máx).

	Nb/Ta	**Zr/Hf**	
Ferro-carbonatitos	14016 (2025-63264)	36.97 (18.28-68)	*15*
Cálcio-carbonatitos	3521.97 (30.68-12742.86)	59.02 (28.57-110.87)	*14*
Fenitos	671.57 (14.98-3400)	46.43 (15-145)	*21*

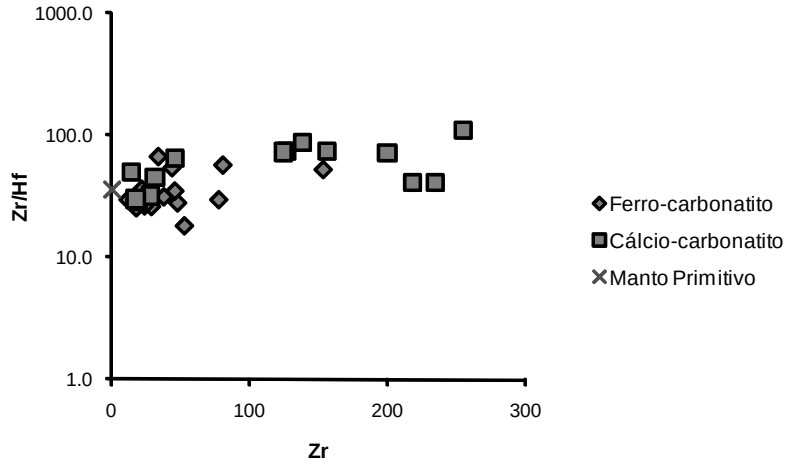


Figura 21. Variação da razão Zr/Hf com o conteúdo em Zr.

Os elementos Nb e Ta mostram comportamentos significativamente diferentes, caracterizados por anomalias marcadamente positivas e negativas, respectivamente. As razões Nb/Ta (**Tabela 14**) cifram-se, em média, em 14016 e 3521.97 para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos*, respectivamente, significativamente superiores às do MP (Nb/Ta = 17) como pode ser observado na **Figura 22** (Sun & McDonough, 1989). Tal como para o Zr/Hf, estes valores supra-mantélicos podem representar metassomatismo por magmas carbonatíticos. As elevadas razões corroboram os conteúdos médios em Nb de 2319.5 ppm (*ferro-carbonatitos*), 985.9 ppm (*cálcio-carbonatitos*) e 328.6 ppm (*fenitos*) comparativamente ao Ta (valores médios≤ 6.54 ppm). Segundo Green *et al.* (1995), a variação da razão Nb/Ta pode ser atribuída ao papel da fraccionação mineral/magma de um mineral rico em Ti. Esta hipótese é perfeitamente legível para o caso de Bailundo, onde o pirocloro com quantidades medianas em Ti entre 3.04 wt% e 5.60 wt%, constitui a principal fase portadora de Nb com teores na ordem de 67.57 wt% (*ferro-carbonatitos*), 70.10 wt% (*cálcio-carbonatitos*) e 64.95 wt% (*fenitos NE*).

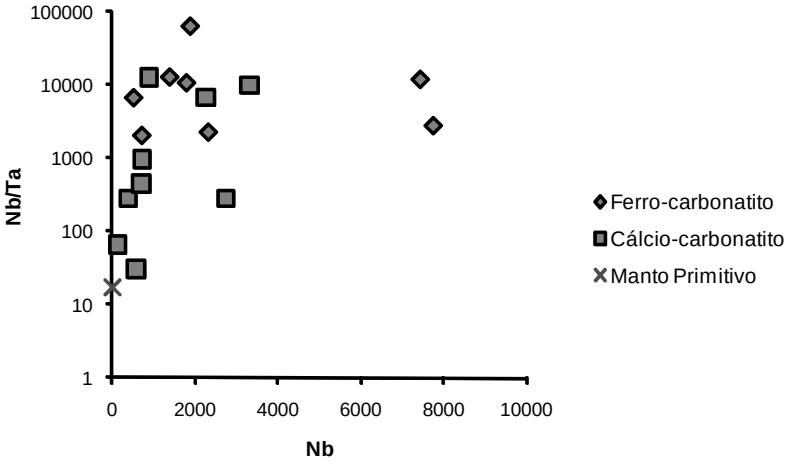


Figura 22. Variação da razão Nb/Ta com o conteúdo em Nb.

CAPÍTULO VII
DISCUSSÃO

Neste capítulo pretende-se integrar e interpretar os dados obtidos apresentados ao longo do trabalho, orientando a discussão no sentido de responder às questões inicialmente colocadas repartidas pelos tópicos seguintes: (i) tipologia das mineralizações em ETR, onde se discutirá os processos responsáveis pelo desenvolvimento das associações minerais ricas em ETR, com base nas observações petrográficas e resultados de química mineral adquiridos; (ii) avaliação do potencial económico em ETR do CCB, onde se efectuará uma comparação com o potencial económico em ETR para outros complexos carbonatíticos angolanos e brasileiros; e (iii) assinatura petrogenética, onde será feito um exame comparativo (Brasil, Angola e Bailundo) que permita estabelecer guias úteis à prospecção e pesquisa mineral.

Tipologia das Mineralizações em ETR

Os carbonatitos continuam a ser a maior fonte em ETR, além de outros elementos como o Nb e P. As mineralizações em ETR podem ser classificadas em três categorias: (i) primárias ou magmatogénicas desenvolvidas nas fases precoces do percurso de cristalização, compreendendo essencialmente disseminações, segregações, *stockworks* ou bolsadas (e.g. bastnäsite e parisite – Mountain Pass, EUA); (ii) magmático-hidrotermais, tipicamente associadas às etapas finais de consolidação e arrefecimento do corpo ígneo, em boa parte síncronas dos processos de fenitização, envolvendo disseminações, bolsadas e veios (e.g. bastnäsite e monazite – Bayan Obo, China; Wigu Hill, Tanzania; Karonge, Burundi) e (iii) sedimentares que compreendem mineralizações residuais (e.g. Araxá, Brasil; Mount Weld, Austrália) (Mariano, 1989).

Pirocloro

No CCB, existem indícios que levam a crer uma origem primária e secundária para as fases minerais do grupo do pirocloro (pirocloro e Ba-pirocloro). Ambas são caracterizadas pela ocorrência de cristais euédricos disseminados na matriz, sugerindo tratarem-se de mineralizações primárias. No entanto, a caracterização textural por si só não deve ser encarada como conclusiva, visto que processos hidrotermais podem ser responsáveis pela formação de novas fases composicionais do grupo do pirocloro (e.g. Bambi *et al.*, 2008; Traversa *et al.*, 2001). Assim, a análise de química mineral torna-se fundamental na interpretação da origem desta fase mineral.

Bambi *et al.* (2008) discutem as mudanças na composição química do pirocloro em função do (i) nível de instalação (plutónico ou vulcânico), (ii) alteração hidrotermal e (iii) processos supergénicos. Conclui que o conteúdo em Ta no pirocloro aumenta de carbonatitos plutónicos para vulcânicos, possivelmente devido à fraccionação de Nb/Ta de forma similar ao que acontece nos sistemas graníticos. Abundância de pirocloros em níveis profundos é congruente com os dados experimentais de Jago & Gittins (1993, *in* Mariano, 1989), que sugerem cristalização a partir de magmas ricos em F, com conteúdos elevados em Nb. Em muitos carbonatitos as concentrações em Ta são baixas (Mariano, 1989 e referências citadas), mas existem excepções, conforme documentado por Hogarth (1989). Com efeito, num mesmo complexo, os conteúdos em Ta podem variar, e os pirocloros mais tardios tendem a revelar enriquecimentos neste elemento (Mariano, 1989). A concentração em Ta nos pirocloros de Bailundo, quando presente (e.g. Ba-pirocloro) é ≤ 0.18 wt%, contrastando com a concentração em Nb com valores medianos máximos de 70.1 wt% (pirocloro – *cálcio-carbonatitos*) e 69.57 wt% (Ba-pirocloro – *cálcio-carbonatitos*) como pode ser observado na **Tabela 15**. Os conteúdos em F para as fases pirocloro são significativos com valores medianos de 1.70 wt% (*cálcio-carbonatitos*) e 3.73 wt% (*fenitos NE*), contrariamente ao que acontece para as fases Ba-pirocloro com conteúdos ≤ 0.02 wt%. Para o primeiro caso parece haver congruência com os dados experimentais de Jago & Gittins (1993), verificando-se o desenvolvimento de apatite. Assim, parece ser possível atribuir uma origem primária para as fases pirocloro, visto apresentarem elevado conteúdo em F e Nb, onde a posição ***B*** (ver capítulo V) é ocupada preferencialmente por Nb, dominando o Ca e o Na na posição ***A*** (ver capítulo V) cujos valores elevados podem ser observados na **Tabela 15**. Na literatura, o desenvolvimento de Ba-pirocloro é normalmente atribuído a processos hidrotermais e supergénicos (e.g. Bambi *et al.*, 2008; Traversa *et al.*, 2001). O Ba é um elemento que se concentra durante o processo evolutivo, tendencialmente no magma mais diferenciado. A observação da **Tabela 16** revela nítido e significativo enriquecimento neste elemento dos *cálcio-carbonatitos* ($\bar{x}$ = 1.10 wt%) para os *ferro-carbonatitos* ($\bar{x}$ = 4.67 wt%). Relacionando com o ID (**Figura 23**), a tendência, apesar de difusa, sugere enriquecimento em BaO com o decréscimo do ID, nomeadamente para os *ferro-carbonatitos*. Este comportamento pode ser facilmente explicável pela compatibilidade do BaO em

função dos diferentes coeficientes de partição nas principais fases minerais presentes nos carbonatitos (carbonatos e fosfatos). Quando a calcite é o principal mineral a cristalizar, a incorporação de Ba na fase sólida é inibida, conduzindo ao aumento da sua concentração nos líquidos mais diferenciados (Loureiro, 1995); tal é o caso dos *ferro-carbonatitos*.

Tabela 15. Conteúdos medianos em ETR nas fases minerais suas portadoras; os conteúdos na cerianite e apatite (*cálcio-carbonatitos*) são dados em média devido ao reduzido número de análises; *N* – número de análises.

	Ferro-carbonatitos			***Cálcio-carbonatitos***				***Fenitos***	
	Ba-Pirocloro	Rabdofanite	Cerianite	Ba-Pirocloro	Pirocloro	Apatite	Parisite	Pirocloro	Apatite
P_2O_5		25.0295	6.11			40.233			41.693
Nb_2O_5	67.57		0.577	69.57	70.104			64.952	
La_2O_3	0.16	8.981			0.127	0.191	11.4	0.11	0.113
Ce_2O_3	1.3	13.446	56.339	0.94	0.402	0.402	23.55	0.817	0.275
Pr_2O_3		2.938	0.015		0.033		3.25	0.042	
Nd_2O_3	0.1	8.536	0.788	0.07	0.083	0.17	4.73	0.153	0.125
Sm_2O_3		2.215	1.18				0.74	0.007	
Eu_2O_3		0.635	0.013				0.14		
Gd_2O_3		2.056	5.656				0.57		
Dy_2O_3		0.624	0.367				0.05		
Yb_2O_3		0.021	0.025				0.05		
Lu_2O_3		0.054	0.059						
ThO_2	0.1	5.881	18.275	0.06	0.126		1.71	1.868	
Y_2O_3		1.308	0.261				0.71		
TiO_2	5.6	0.1		4	3.039			3.998	
Fe_2O_3	0.27		4.373	0.6	0.159				
CaO	0.02	2.78	0.591	0.01	17.241	54.363	9.24	17.207	54.375
SrO		2.52			1.071	0.279	1.27	0.287	0.399
BaO	19.16	0.82	0.126	14.1					
Na_2O						0.2095		6.083	0.175
K_2O	0			0.19					
F	0.01	0.78	0.588		1.696	2.58	7.01	3.734	2.885
CO_2							30.53		
N	*18*	*50*	*2*	*16*	*35*	*5*	*6*	*48*	*88*

Tabela 16. Conteúdos medianos em BaO (wt%).

	Ferro-carbonatitos	***Cálcio-carbonatitos***	***Fenitos***
Mínimo	0.81	0.03	0.04
Máximo	11.96	3.99	18.27
Média	4.67	1.10	1.94
Mediana	4.62	0.867	0.28
N	*15*	*14*	*21*

No pirocloro, elevadas concentrações em Ba são tidas como evidência para a sua origem secundária (Mariano, 1989). Na mina de Araxá (Brasil), o Ba-pirocloro é o mineral do grupo do

pirocloro mais importante, sendo interpretado por Heinrich (1980) como um produto da actividade hidrotermal tardia (Traversa *et al.*, 2001). Com base nos resultados analíticos obtidos e estabelecendo uma analogia com Araxá, é possível interpretar o Ba-pirocloro como uma fase tardia de alteração hidrotermal, onde o Ca foi facilmente substituído pelo Ba, isso porque durante este processo o conteúdo da posição ***B*** (Nb-Ta-Ti) não é alterável, contrariamente ao da posição ***A*** (Ca-Na) que pode ser facilmente removido e substituído.

Gerações tardias de pirocloro associadas a processos supergénicos mostram enriquecimento em ETR e Sr (Bambi *et al.*, 2008), facto não evidenciável para os pirocloros de Bailundo, com conteúdos em ETR e SrO inferiores a 1.3 wt% e 1.1 wt%, respectivamente (**Tabela 15**), sustentando mais uma vez a origem do primária do pirocloro e hidrotermal do Ba-pirocloro. A **Figura 24** mostra uma nítida correlação negativa entre as ETR e o Nb, particularmente evidente para os exemplares dos *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos*, onde o enriquecimento em ETR é acompanhado por decréscimo de Nb, perfeitamente corroborado pelas quantidades traço em ETR no pirocloro rico em Nb.

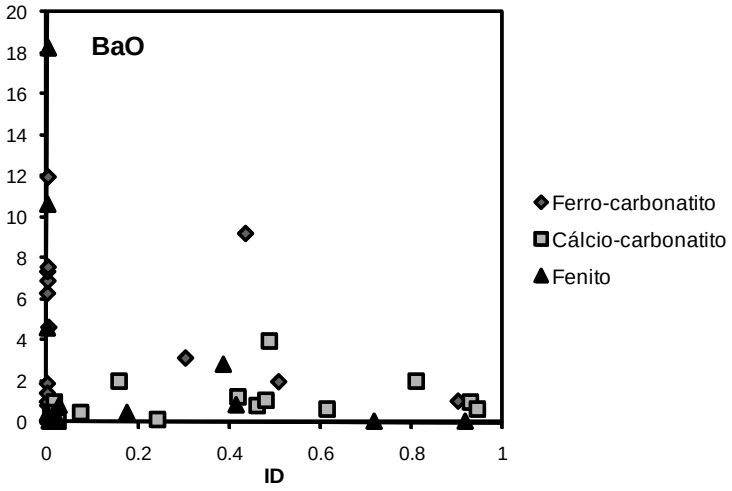


Figura 23. Diagramas de variação para ID= CaO/(CaO + MgO + $Fe_2O_3^T$ + MnO) *versus* BaO; concentrações em wt%.

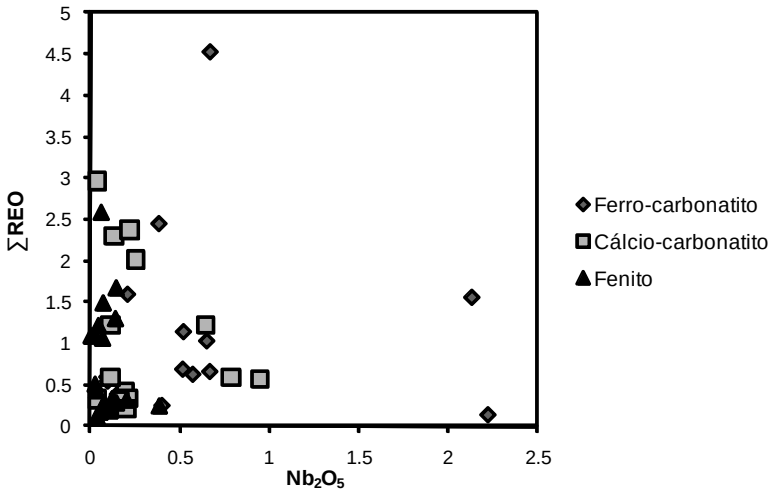


Figura 24. Diagrama de variação das ETR em função do Nb_2O_5; valores de concentração em wt%.

Apatite

A apatite é uma fase mineral acessória relativamente frequente nas litologias de Bailundo, constituindo cristais prismáticos que ocorrem isoladamente ou formando agregados monominerálicos. Tal como o pirocloro, apresenta baixos conteúdos em ETR (inferiores a 0.4 wt%, **Tabela 15**), sugerindo, segundo Issa Filho *et al*. (1991), três possibilidades: (i) alta temperatura de cristalização, dado que o coeficiente de partição mineral/magma apresenta normalmente menores valores a altas temperaturas; (ii) cristalização a partir de um magma empobrecido em ETR como resultado do fraccionamento da fase concentradora de ETR; e (iii) fraccionação dos ETR por complexação e transporte num fluido rico em [CO_2 + F], cuja cristalização tenha ocorrido num estádio tardio ou pós-magmático. A segunda hipótese é excluída, pois era necessário a ocorrência de uma fase primária que concentrasse a maior parte das ETR, o que não é o caso dos fosfatos (rabdofanite), óxidos (cerianite) e flúor-carbonatos (parisite) que têm uma origem claramente secundária, como será discutido de seguida. O pirocloro, sendo uma fase primária, também não corrobora esta hipótese pois apresenta, tal como a apatite, conteúdos traço em ETR. Note-se que as apatites do CCB apresentam, além de ETR, baixo conteúdo em SrO (0.4 wt%), pelo que é possível considerar a intervenção de fluidos hidrotermais capazes de dissolver a apatite, removendo o Sr e os ETR e reprecipitando a mesma com baixos conteúdos nestes elementos. Se a apatite tivesse uma origem primária seria de esperar que se encontrasse intercrescida com o pirocloro, o que não acontece.

Rabdofanite, parisite e cerianite

Na maioria dos carbonatitos os elementos de ETR precipitam a partir de soluções hidrotermais, cujas temperaturas variam desde elevadas a próximas da temperatura ambiente. As soluções magmático-hidrotermais que tipicamente se associam aos estádios tardios de instalação dos carbonatitos geram fluidos que facilmente dissolvem determinados minerais, como a apatite, removendo os ETR (Mariano, 1989). Nestes sistemas petrogenéticos os minerais de ETR surgem em filonetes e intercrescimentos matriciais, de granularidade muito fina (Mariano, 1989); tal é o caso dos fosfatos (rabdofanite), flúor-carbonatos (parisite) e óxidos (cerianite) de ETR. A textura destas fases aliada aos elevados conteúdos em ETR sugere uma origem secundária, hidrotermal e/ou supergénica. Para além disto, partindo do modelo evolucionário da série *cálcio-carbonatitos* – *magnésio-carbonatito* – *ferro-carbonatitos* proposto por Woolley & Kempe (1989) para as ocorrências carbonatíticas, não se verifica qualquer correlação entre os ETR e a composição química das rochas (**Figura 25**). A cerianite tem sido encontrada em zonas de meteorização em depósitos como Poço de Caldas (Minas Gerais, Brasil) e Lachner Township (Sudbury, Ontario); a sua formação está normalmente associada a processos supergénicos onde o Ce^{3+} é oxidado para Ce^{4+} e separado dos outros ETR, formando a cerianite (Van Wambeke, 1977 e referências citadas).

A observação dos padrões de ETR normalizados relativamente ao condrito (capítulo VI) permite verificar uma anomalia negativa na amostra BL-P 26 correspondente à ocorrência deste mineral, congruente com a formação de Ce^{4+}, contudo a análise de química mineral revelou a presença de Ce^{3+}; estudos adicionais devem ser realizados, no sentido de determinar com maior exactidão a composição deste mineral. A rabdofanite é um mineral tipicamente secundário, normalmente resultante da meteorização de outros minerais de ETR pré-existentes como a bastnäsite.

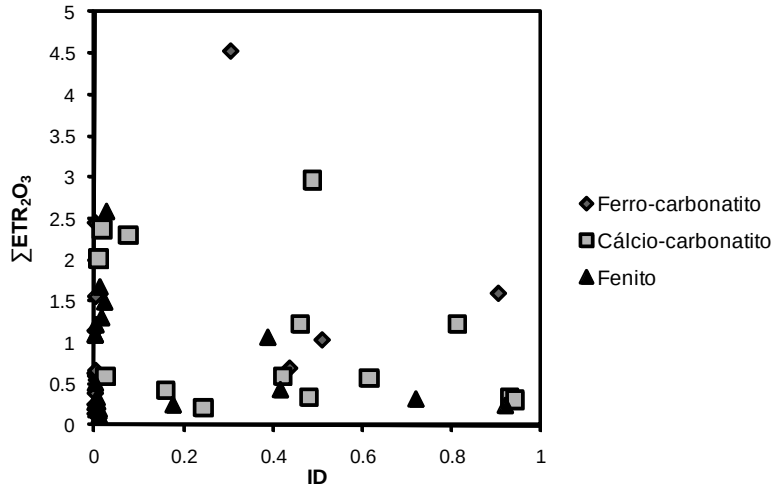


Figura 25. Diagrama de variação do ID = CaO/(CaO + MgO + $Fe_2O_3^T$ + MnO) *versus* ETR_2O_3; valores de concentração em wt%.

O Potencial Económico em ETR do Complexo Carbonatítico de Bailundo

Com base nos resultados obtidos relativamente às ocorrências de minerais portadores de ETR, afigura-se plausível sustentar a designação de mineralização, no sentido de existirem concentrações em ETR passíveis de gerar interesse económico.

Os ETR, como já foi referido em capítulos anteriores, são frequentemente explorados como subprodutos de minérios polimetálicos, tornando-se deste modo, importante apresentar uma sinopse do potencial metalogenético de Bailundo noutros metais, trabalho documentado em Santos (2010).

No CCB os valores de concentração multi-elementar revelam distribuições fortemente assimétricas com elevado potencial metalogenético, nomeadamente para Fe, Ti, Ba, P, Sr, Nb (± F, Ga, Ge). Os conteúdos máximos para o **$Fe_2O_3^T$** cifram-se em 80.7 wt% (*ferro-carbonatitos*), sendo caracterizado por valores medianos de 59.9 wt%, 9.3 wt% e 13.3 wt%, para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente. Estes valores traduzem o enriquecimento das litologias em espinelas ferríferas (magnetite *s.l.*), nomeadamente nos *ferro-carbonatitos*, e fases (hidr)óxidas como goethites, lepidocrocite, brookite e anátase. Os sectores central e NE dos *ferro-*

carbonatitos são os que manifestam maior enriquecimento, destacando-se, adicionamelmente, alguns segmentos das faixas que marcam a transição desta litologia para os *cálcio-carbonatitos*; os conteúdos mais elevados em ferro definem uma anomalia que tende a desenvolver-se segundo a direcção NNE-SSW (Santos, 2010; Santos *et al.*, 2009b).

Os conteúdos em **TiO_2** apresentam valores medianos de 1 .44 wt%, 0.15 wt% e 0.20 wt%, para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente, atingindo o valor máximo de 1.55 et% nos *ferro-carbonatitos* (Santos, 2010; Santos *et al.*, 2009b).

As anomalias em **Nb_2O_5**, com valores máximos de 2.2 wt% (*ferro-carbonatitos*) estão bem marcadas e desenvolvem-se no sector Sul da área ocupada pelos *ferro-carbonatitos* com valores medianos de 0.52 wt%, definindo um alinhamento forte segundo a direcção NW-SE. Para os *cálcio-carbonatitos* e *fenitos* os valores medianos cifram-se em 0.2 wt% e 0.07 wt%, respectivamente. Os enriquecimentos em **BaO** fazem-se também sentir neste sector com valores máximos de 18.3 wt% (*fenitos*), em parte sobrepondo-se ao Nb_2O_5, mas conduzindo a uma anomalia com alongamento principal segundo NNW-SSE e uma proeminência secundária próxima do contacto com os *cálcio-carbonatitos* a ESE. Os valores medianos cifram-se em 4.5 wt%, 0.87 wt% e 0.28 wt%, para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente (Santos, 2010; Santos *et al.*, 2009).

Para os restantes elementos, **P_2O_5**, **SrO**, (± **F**, **Ga**, **Ge**) os valores máximos cifram-se em 13.7 wt% P_2O_5, 3.1 wt% SrO, 1.55 wt% F, 69 ppm Ga e 10 ppm Ge. Os *ferro-carbonatitos* são caracterizados por conteúdos medianos de 0.66 wt% P_2O_5, 0.1 wt% SrO, 0.05 wt% F, 12 ppm Ga e 3.1 ppm Ge. Os *cálcio-carbonatitos* apresentam, por sua vez, conteúdos medianos de 0.62 wt% P_2O_5, 0.2 wt% SrO, 0.13 wt% F, 15 ppm Ga e 2 ppm Ge. Os *fenitos*, no seu todo, comportam conteúdos medianos de 0.32 wt% P_2O_5, 0.03 wt% SrO, 0.13 wt% F, 19 ppm Ga e 3 ppm Ge (Santos, 2010; Santos *et al.*, 2009b).

A avaliação do potencial económico em **ETR** é expressa em REO (acrónimo anglo-saxónico), isto é, total de óxidos de terras raras. Elementos como o Y e o Sc mostram fortes afinidades geoquímicas para com os ETR, pelo que é comum considerá-los na determinação do total de óxidos, usualmente expresso sob a forma REO*. O Nb é um elemento que, à semelhança do Y e Sc, se associa frequentemente às ETR em complexos carbonatíticos. Os ETR são elementos que apresentam concentrações normalmente baixas na crusta (**Tabela 17**), pelo que valores de concentração acima de ca. 1000 ppm têm significado em termos de prospecção, apresentando os minérios comuns valores≥ 3000 -5000 ppm (i.e.≥ 0.3 -0.5%). Os teores de corte usados para as ETR variam, mas a maioria cifra-se em concentrações acima dos 1.5% (Mateus, 2009). Informações mais detalhadas e relação ao potencial económico do CCB em Nb são apresentadas no trabalho de Santos (2010).

Tabela 17. Abundâncias médias crustais para os Elementos do Grupo das Terras Raras (*in* Mateus, 2009).

Símbolo	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Nº At.	57	58	59	60	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
ppm	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	3.5	0.8	2.3	0.33	2.2	0.32

A determinação dos valores REO* para o CCB é apresentada tendo em conta os seus subconjuntos principais, (i) *ferro-carbonatitos*, (ii) *cálcio-carbonatitos* e (iii) *fenitos* (**Tabela 18**) revelando valores mais elevados para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos* com conteúdos totais médios em REO* na ordem de 1.2 wt% (1.26 wt% e 1.16 wt% para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos*, respectivamente), contrastando com os *fenitos*, para o qual se obtém um valor global de 0.75 wt% . Para os *fenitos*, se tomarmos em conta os três subconjuntos em que se divide, obtem-se valores de REO* que se cifram aproximadamente em 0.8 para os *fenitos NE* e *SE* e 0.7 para os *fenitos NW*. Os dados obtidos confirmam as inferências realizadas com base nas informações de química mineral, demonstrando predomínio claro das ETRL, pelo que refazendo os cálculos e considerando apenas as concentrações em La, Ce, Pr, Nd e Sm, resultam valores REO* de 1.1 wt% para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos* e 0.7 wt% para os *fenitos* (**Tabela 18**), não se afastando de forma significativa dos totais apurados com base na totalidade dos conteúdos em ETR. Para o Th foram calculados valores médios de 0.07 wt% para os *ferro-carbonatitos* e 0.03 wt% para os *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, não muito distantes dos obtidos para o Y (0.1 wt%, 0.05 wt% e 0.04 wt%, para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente) e Sc (0.01 wt% para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos* e 0.002 wt% para o *fenitos*).

Tabela 18. Conteúdos elementares em REE, REO, REO* e ThO_2 para o CCB.

		Mínimo	**Máximo**	**Média**	**Mediana**	***N***
Ferro-carbonatitos	ETR (ppm)	541.74	19364.88	4919.52	2856.12	*15*
	REO (%)	0.13	4.54	1.15	0.67	
	REO* (%)	**0.14**	**4.67**	**1.26**	**0.81**	
	Th (ppm)	58	1840	643.47	454	
	ThO_2 (%)	0.01	0.21	0.07	0.05	
Cálcio-carbonatitos	ETR (ppm)	910.81	12643.78	4718.17	2533.35	*14*
	REO (%)	0.21	2.96	1.10	0.59	
	REO* (%)	**0.22**	**3.02**	**1.16**	**0.64**	
	Th (ppm)	20.20	943.00	266.67	130.50	
	ThO_2 (%)	0.00	0.11	0.03	0.01	
Fenitos	ETR (ppm)	464.87	11048.58	3034.80	1395.37	*21*
	REO (%)	0.11	2.58	0.71	0.33	
	REO* (%)	**0.12**	**2.67**	**0.75**	**0.33**	
	Th (ppm)	20.10	2350.00	284.93	154.00	
	ThO_2 (%)	0.00	0.27	0.03	0.02	

O La e Ce apresentam os valores de concentração elementar mais elevados em amostras como a BL-P 36 com 8460 e 8410 ppm, respectivamente, concordante com o valor máximo de REO* obtido de 4.7 wt%; para os *cálcio-carbonatitos* obtiveram-se valores máximos de REO* de 3 wt% (4200 e 6530 ppm de La e Ce, respectivamente) para a amostra BL-P 27; os valores máximos para os *fenitos* correspondem a 2820 ppm para o La e 4690 ppm para o Ce, correlativo de 2.7 wt% REO*, para a amostra BL-P 77. Apesar destes valores "anómalos", os valores de concentração em La e Ce não são suficientes para gerar totais de REO* de interesse económico, visto representarem a ocorrência pontual de amostras anómalas, produzindo totais de REO* que se cifram em média 0.9% para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos* e 0.5% para os *fenitos*. Contudo, os valores de concentração das ETRL (La, Ce, Pr, Nd e Sm) são suficientes para gerar totais de REO* de 1.19% para os *ferro-carbonatitos*, 1.12 para os *cálcio-carbonatitos* e 0.7% para os *fenitos*, semelhantes aos já descritos no parágrafo anterior, considerando os ETRI e ETRP (**Tabela 19**).

Tabela 19. Conteúdos elementares em REE, REO e REO* para o CCB.

		ETR (ppm)	**REO (%)**	***N***
Ferro-carbonatitos	La	1506.64	0.35	*15*
	Ce	1969.07	0.46	
	Pr	224.52	0.05	
	Nd	752.71	0.18	
	Sm	145.31	0.03	
	Sc	50.5	0.01	
	Y	329.18	0.10	
	REO*		**1.19**	
Cálcio-carbonatitos	La	1248.71	0.29	*14*
	Ce	2241.14	0.52	
	Pr	230.53	0.05	
	Nd	705.36	0.16	
	Sm	110.56	0.03	
	Sc	25.07	0.01	
	Y	155.95	0.05	
	REO*		**1.12**	
Fenitos	La	649.52	0.15	*21*
	Ce	1348.19	0.32	
	Pr	164.19	0.04	
	Nd	628.16	0.15	
	Sm	100.86	0.02	
	Sc	11.30	0.00	
	Y	115.82	0.04	
	REO*		**0.71**	

A concentração mais elevada em Y cifra-se em 1140 ppm (i.e. 0.3 wt% Y_2O_3) para a amostra BL-P 9 dos *ferro-carbonatitos*. A concentração mais elevada em Sc e Th cifra-se em 146 ppm (0.04 wt%) e 2350 ppm (0.27 wt%), respectivamente (**Tabela 19**). De entre os ETRP, destaca-se o Gd cujos conteúdos atingem 466, 197 e 218 ppm em amostras dos *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente.

Com o propósito de examinar, ainda que tentativamente, o traçado das linhas de isoconcentração para as ETR no CCB, procedeu-se à interpolação dos conteúdos em óxido elementar admitidos pelo subgrupo de amostras localizado na estrutura central do CCB, usando o *kriging* ordinário. Não obstante a irregularidade manifestada pela distribuição espacial das amostras poder introduzir alguma perturbação na geometria (e, consequentemente, na delimitação) dos sectores composicionalmente anómalos, os mapas geoquímicos permitem concluir que os ETRP e o Y_2O_3 (**Figuras 26** e **27**, respectivamente) desenvolvem anomalias no seio do sector central dos *ferro-carbonatitos*, cobrindo parcialmente a interface com o depósito eluvio-coluvionar a WNW e formando um alinhamento grosseiro segundo a direcção WNW-ESE que não se sobrepõe aos domínios anómalos em REO (**Figura 28**), REO* (**Figura 29**), ETRL (**Figura 30**), Ce_2O_3 (**Figura 31**) e La_2O_3 (**Figura 32**); estes últimos localizam-se no sector SW dos *ferro-carbonatitos* (incluindo interface com os *cálcio-carbonatitos* e eluvio-coluvião), desenhando um alinhamento de rumo geral NE-SW.

No fluxograma de extracção de um metal, o processamento da matéria-prima experimenta um conjunto de operações, envolvendo tanto transformações físicas e químicas, que convertem o minério extraído num composto que pode corresponder ao produto final ou ao alimentador intermédio de nova transformação para posterior produção de metal (ou liga), ou outro componente. Este processo, na maioria dos casos, tem como objectivo remover as impurezas do material a ser processado. No caso dos ETR, o processamento envolve não apenas as operações que resultam da remoção de tais impurezas, mas também de operações específicas que pretendem alcançar a difícil tarefa de separar os ETR umas em relação às outras. Os minerais de ETR são numerosos, no entanto a grande parte da exploração actual de ETR é principalmente a partir da monazite e bastnäsite como já foi referido no Capítulo II. Também já referido no mesmo capítulo, os ETR apresentam comportamento químico similar, pelo que promove a ocorrência dos mesmos em diferentes fases minerais com proporções relativas variadas, característica que dificulta a sua separação (Gupta *et al*., 2005).

A natureza da ocorrência e distribuição dos minerais de ETR em geral assegura que possam ser recuperados como subprodutos ou co-produtos, excepto o caso particular da bastnäsite em Mountain Pass, onde o beneficiamento físico do mineral de ETR é o mesmo para o principal recurso mineral. Assim torna-se útil fazer uma síntese geral dos minerais portadores em ETR, indicando os elementos presentes e seu conteúdo (Gupta *et al*., 2005), de maneira a facilitar o planeamento do beneficiamento dos ETR por parte da Genius Mineira Lda..

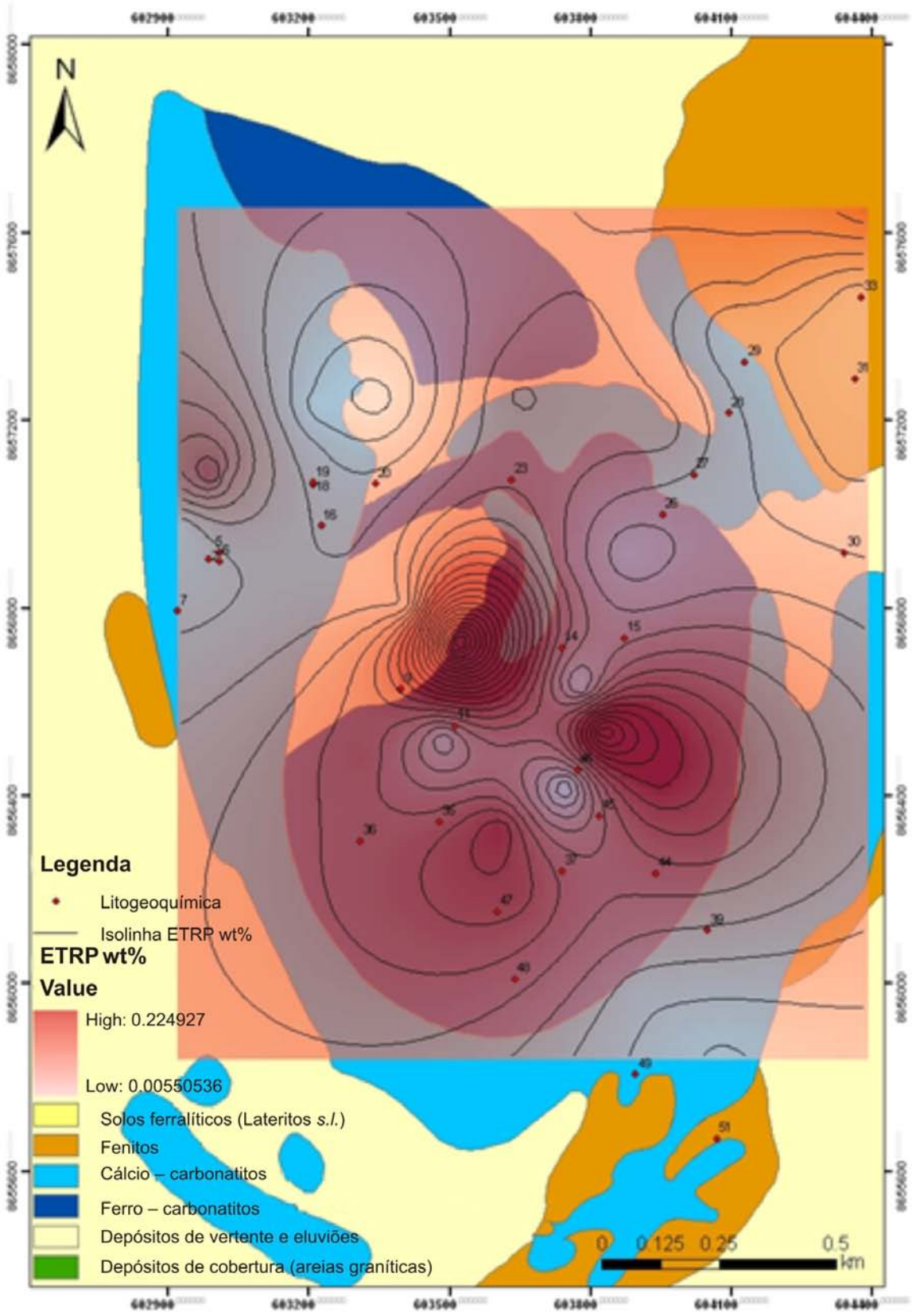


Figura 26. Linhas de isoconcentração em ETRP para o domínio central do CCB, tomando como referência a distribuição espacial das amostras analisadas.

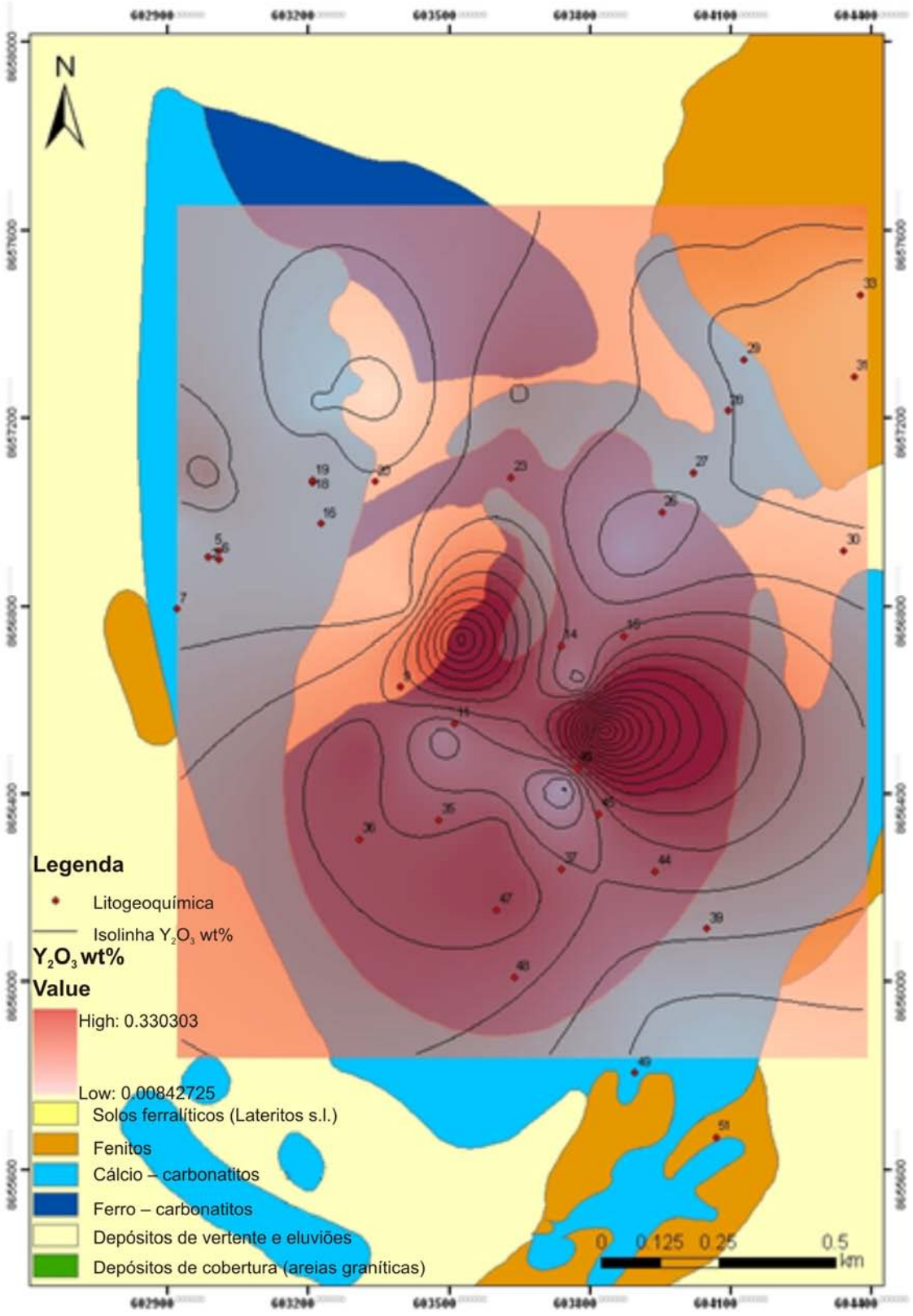


Figura 27. Linhas de isoconcentração em Y_2O_3 para o domínio central do CCB, tomando como referência a distribuição espacial das amostras analisadas.

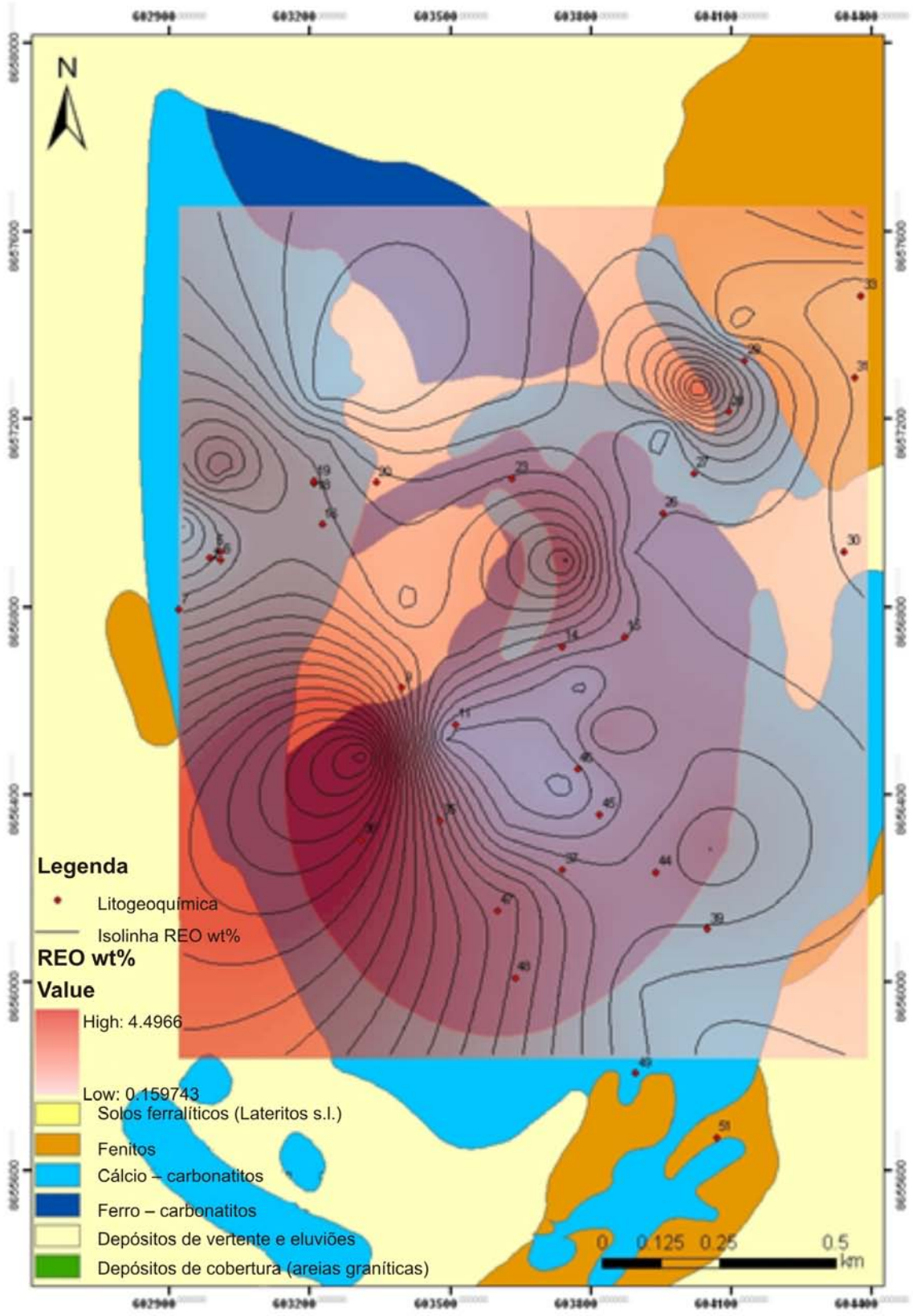


Figura 28. Linhas de isoconcentração em REO para o domínio central do CCB, tomando como referência a distribuição espacial das amostras analisadas.

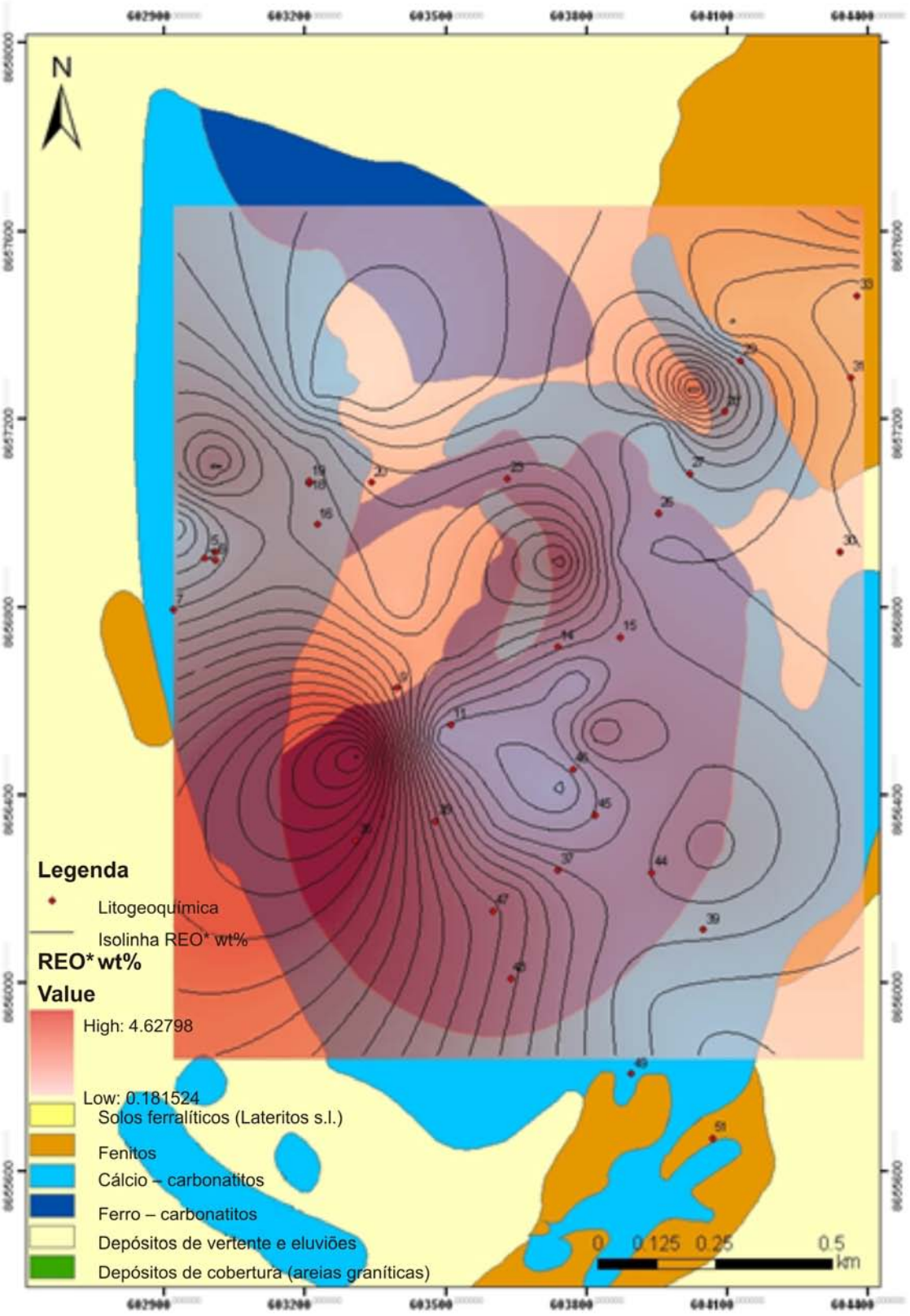


Figura 29. Linhas de isoconcentração em REO* para o domínio central do CCB, tomando como referência a distribuição espacial das amostras analisadas.

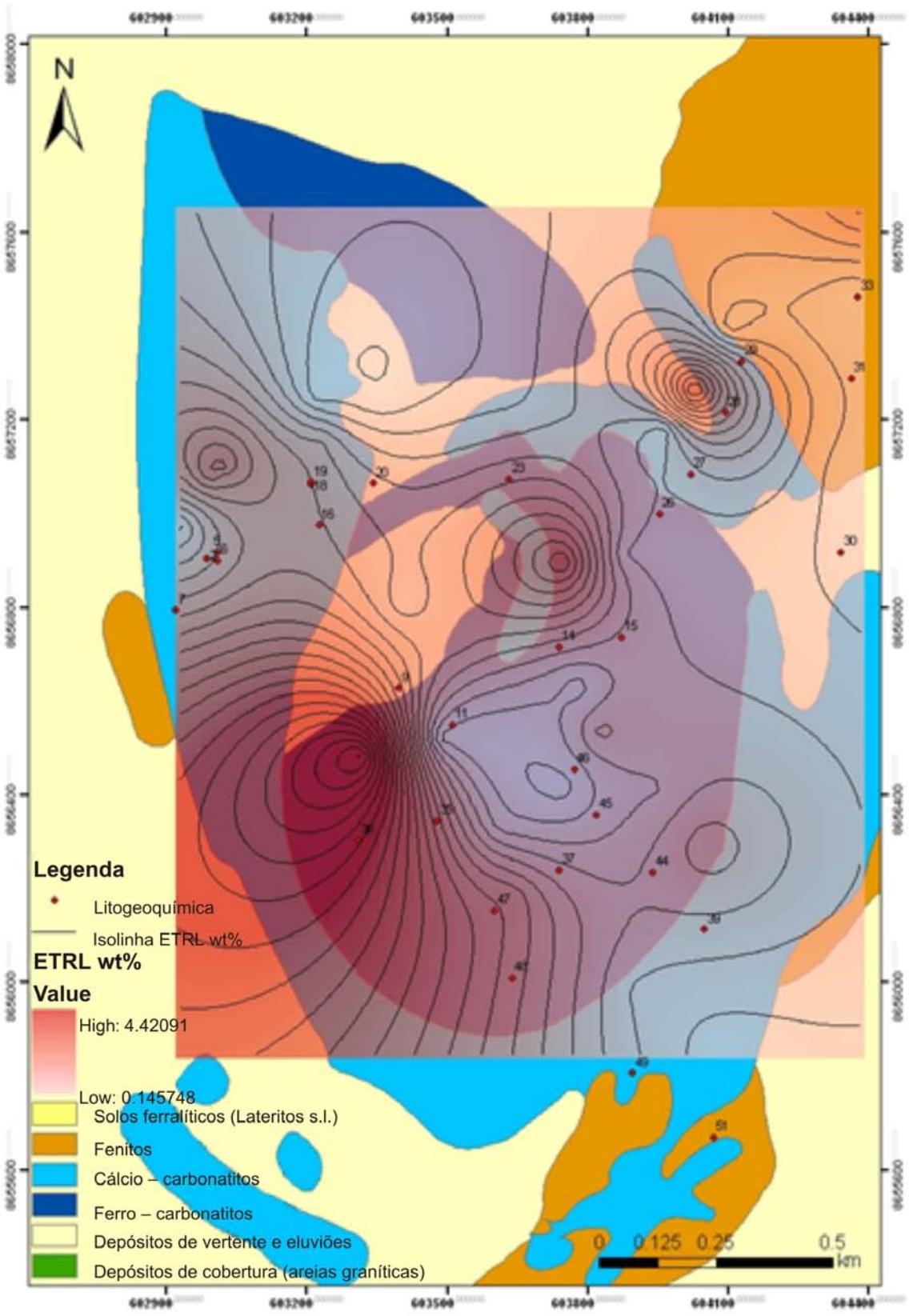


Figura 30. Linhas de isoconcentração em ETRL para o domínio central do CCB, tomando como referência a distribuição espacial das amostras analisadas.

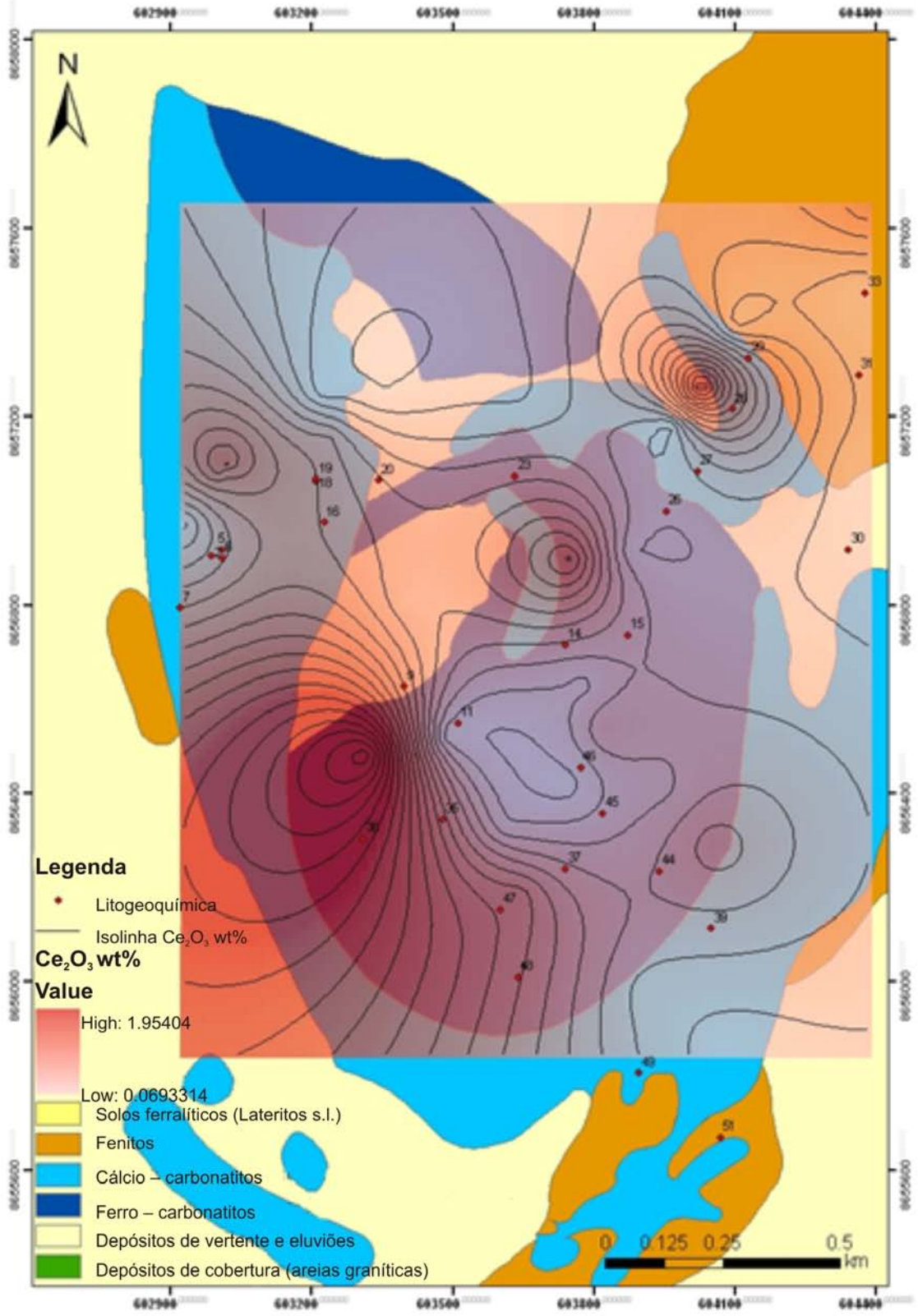


Figura 31. Linhas de isoconcentração em Ce_2O_3 para o domínio central do CCB, tomando como referência a distribuição espacial das amostras analisadas.

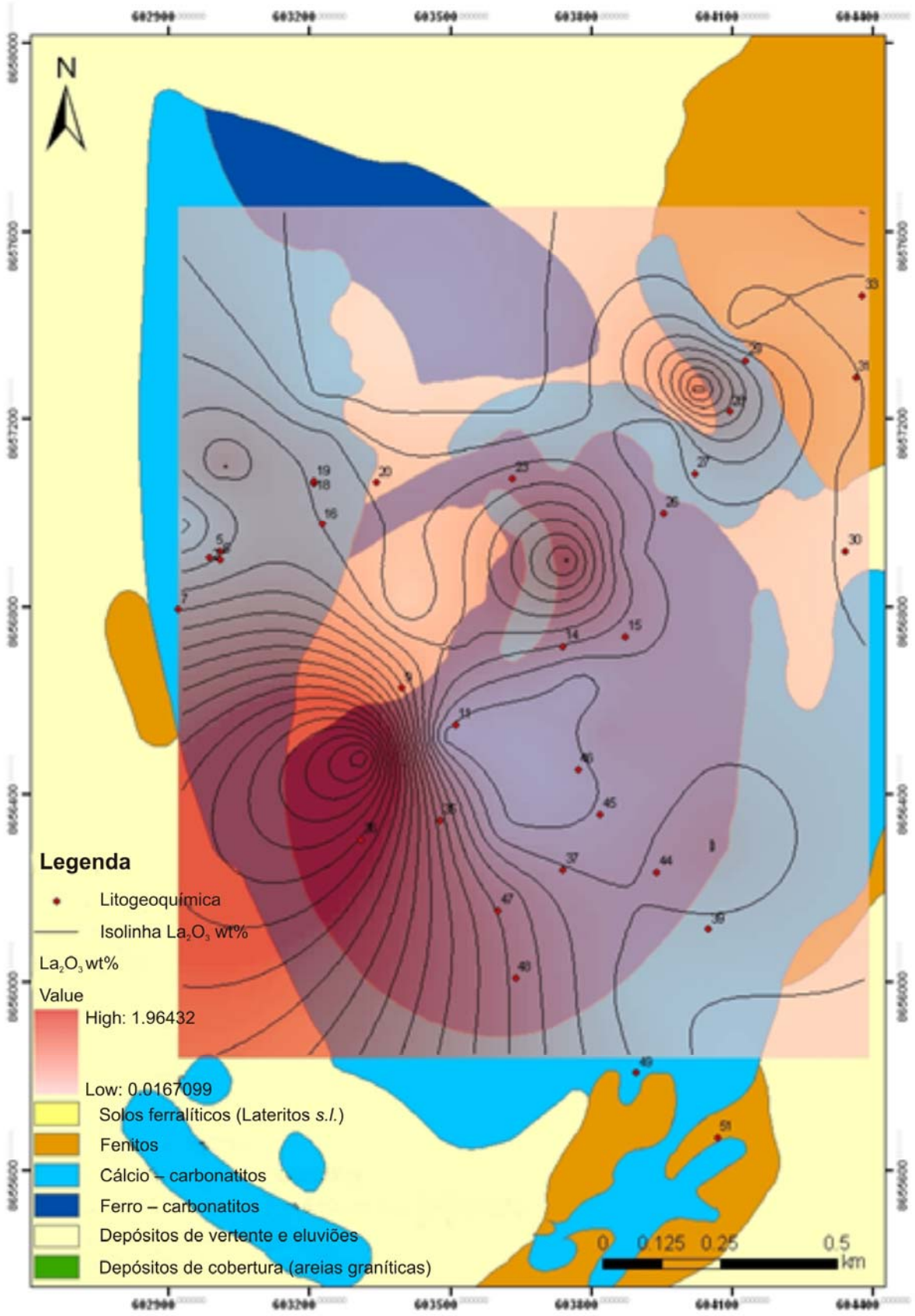


Figura 32. Linhas de isoconcentração em La_2O_3 para o domínio central do CCB, tomando como referência a distribuição espacial das amostras analisadas

Os resultados analisados anteriormente conferem com os apresentados na química mineral de onde se infere que os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos* são responsáveis pelos conteúdos elevados em ETR. Na **Tabela 20** encontram-se os conteúdos medianos em ETR, ETRL e ETRP para os minerais portadores dos mesmos subdivididos por cada conjunto litológico. A análise permite concluir que os principais minerais portadores são fosfatos do grupo da rabdofanite, presentes nos *ferro-carbonatitos*, com conteúdos em ETR, ETRL e ETRP de 47.58 wt%, 44.13 wt% e 3.56 wt%, respectivamente e flúor-carbonatos, presentes nos *cálcio-carbonatitos*, representadas maioritariamente pela parisite com 44.83 wt%, 43.86 wt% e 0.76 wt%, pela mesma ordem anteriormente referida. Acresce referir os intercrescimentos entre flúor-carbonatos e outras fases minerais, não permitindo a identificação fidedigna do mineral, possuírem valores de ETR aproximados aos referidos anteriormente. Para a rabdofanite, os ETRL predominantes são o Ce, Nd e La com valores medianos de 13.45 wt%, 8.54 wt% e 8.98 wt%, respectivamente e, para a parisite, obtém-se maiores conteúdos em Ce, La e Pr com 23.55 wt%, 11.40 wt% e 3.25 wt%, respectivamente. A cerianite apresenta os conteúdos mais elevados em ETR (64.4 wt%), ETRL (58.32 wt%) e ETRP (6.12 wt%); no entanto a sua escassez não permite considerá-la, para já, o principal mineral portador em ETR, além de que os elevados conteúdos em ETRL são justificados em mais de 90% pelo Ce com valores médios de 56.34 wt%. As fases do grupo do pirocloro e a apatite revelam ser os minerais com fraco potencial em ETR, com concentrações de ETR≤ 1.47 wt% e ≤ 0.84 wt%, respectivamente; contudo o piroloro mostra elevado potencial em Nb com 70.1 wt% (cálcio-carbonatitos), 67.57 wt% (ferro-carbonatitos) e 64.95 wt% (fenitos).

Os conteúdos em Th revelam-se extremamente elevados para a cerianite com 17.66 wt%, e mais baixos, ainda assim significativos, para a rabdofanite (5.88 wt%), pirocloro dos *fenitos NE* (1.87 wt%) e parisite (1.71 wt%). O Y apenas se encontra na cerianite, rabdofanite e parisite com conteúdos que se cifram em 0.25 wt%, 1.31 wt% e 0.71 wt%, respectivamente.

Tabela 20. Conteúdos medianos em ETR para as fases minerais portadoras dos mesmos; *N* – número de análises efectuadas.

		ETR	ETRL	ETRP	*N*
Ferro-carbonatitos	Cerianite	64.4	58.32	6.12	*2*
	Ba-Pirocloro	-	1.57	-	*18*
	Rabdofanite	47.58	44.13	3.56	*50*
Cálcio-carbonatitos	Ba-Pirocloro	-	1.05	-	*16*
	Pirocloro	-	0.72	-	*35*
	Apatite	-	0.84	-	*5*
	Parisite	44.83	43.86	0.76	*6*
Fenitos	Pirocloro	-	1.13	-	*48*
	Apatite	-	0.48	-	*88*

O Potencial Económico de Bailundo *versus* Angola e Brasil

De seguida será apresentado um exame comparativo das características litogeoquímicas obtidas para Bailundo com as que se encontram publicadas para os complexos carbonatíticos de Angola e Brasil com o propósito de contextualizar o potencial económico em ETR e identificar tendências susceptíveis de fornecer guias úteis à prospecção e pesquisa mineral. Note-se, contudo, que os resultados desta abordagem são puramente indicativos e carecem de validação posterior, pois (nomeadamente para os complexos carbonatíticos angolanos) existem algumas lacunas de informação e a amostragem apresentada nos vários documentos consultados não parece ser suficiente para sustentar uma interpretação robusta. Para os complexos carbonatíticos brasileiros, à excepção de Juquiá, não existem lacunas de informação e os dados disponíveis e amostragem parecem ser fidedignos. Como referência foram tomados em conta dados de litogeoquímica compilados para 7 complexos carbonatíticos angolanos (Bailundo, Sulima-Monte Verde, Coola, Virulundo, Lupongola, Logonjo e Tchivira-Bonga) apresentados por Alberti *et al.* (1999), excepto Virulundo, cujos dados foram retirados de Lapido Loureiro (1995), e 5 complexos carbonatíticos Brasileiros (Angico dos Dias, Araxá, Juquiá, Jacupiranga e Itapirapuã), tal qual são apresentados por Antonini *et al.* (2003), Traversa *et al.* (2001), Beccaluva *et al.* (1992) *in* Lapido Loureiro (1995), Huang *et al.* (1995) e Ruberti *et al.* (2002). Para Fazenda Varela-Lages, Seis Lagos, Catalão I e II, Tapira e Mato Preto II, com resultados disponíveis em Lapido Loureiro (1995), não foi possível fazer tal abordagem mercê das numerosas lacunas de informação no que respeita aos ETR.

Para o CCB Lapido Loureiro (1995) reporta totais de REO* elevados (2.9 %) para amostras de *ferro-carbonatitos* (siderítico) e *magnésio-carbonatitos* (dolomítico) com 1.6 %. No entanto, observando a **Tabela 21**, verifica-se que o número de amostras considerado é demasiado baixo para garantir representatividade espacial destas unidades. Logo, se considerarmos apenas as concentrações elementares obtidas para amostras de *cálcio-carbonatitos* (*N* = 10), obtém-se um total de REO* de 0.8 %, isto é, inferior ao total de REO* obtido para os *cálcio-carbonatitos* de Bailundo.

A **Figura 33** ilustra o diagrama Nb-Ba-ETR para Bailundo e outros complexos carbonatíticos angolanos (Sulima-Monte Verde, Logonjo, Coola, Tchivira-Bonga, Lupongola, Virulundo e Bailundo); quando se estabelecer a comparação entre os dados obtidos para Bailundo e dados da literatura, adoptar-se-á a designação Bailundo_09 para os dados reportados neste trabalho e Bailundo para os dados bibliográficos. Comecemos por comparar com os resultados obtidos para Bailundo listados em Alberti *et al*. (1999), verificando-se que a maioria das amostras se encontra projectada junto ao extremo composicional (BaO+SrO+CaO+MgO), não revelando o carácter composicional heterogéneo que caracteriza as unidades litológicas de Bailundo; este facto pode

Tabela 21. Concentrações elementares médias em REO* e REE e REO para o CCB *in* Lapido Loureiro, 1995.

		ETR	REO	*N*
Cálcio-carbonatitos	Ce	1902	0.45	*10*
	La	1378	0.32	
	Y	130	0.04	
	REO*		**0.81**	
Magnésio-carbonatitos	Ce	3593	0.84	*3*
	La	2480	0.58	
	Y	445	0.14	
	REO*		**1.56**	
Ferro-carbonatitos	Ce	7167	1.68	*3*
	La	4933	1.16	
	Y	272	0.08	
	REO*		**2.91**	

dever-se à sub-amostragem visto representar apenas cinco análises. Para Bailundo_09 as amostras tendem significativamente no sentido dos restantes termos composicionais com conteúdos medianos de 0.59 wt% ETR_2O_3, 0.65 wt% (Nb_2O_5+TiO_2) e 5.25 wt% de (BaO+SrO+CaO+MgO).

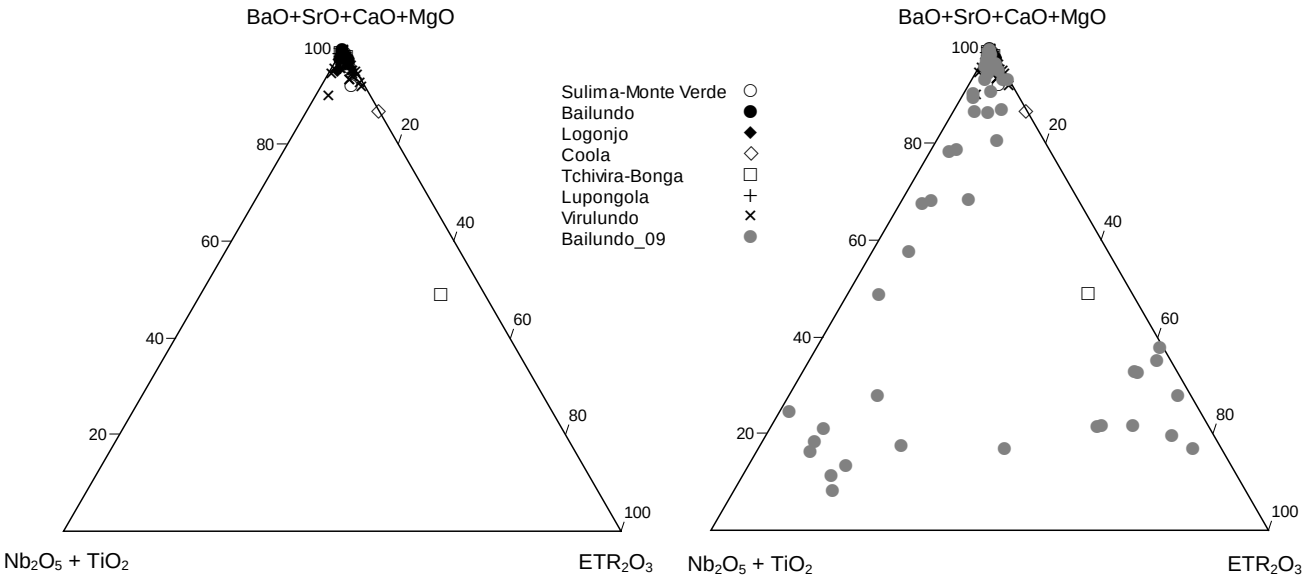


Figura 33. Projecção das características litogeoquímicas, no diagrama Nb-Ba-ETR, para Bailundo e outros complexos carbonatíticos angolanos reportados na literatura por outros autores.

Na **Tabela 22** estão representados os conteúdos em ETR, REO e REO* para os complexos carbonatíticos angolanos com base em dados bibliográficos. Os conteúdos medianos em REO* mais elevados são obtidos para Virulundo com 1.23 wt%, muito embora importe sublinhar o facto

deste valor contemplar apenas o La e Ce, únicas concentrações em ETR disponíveis na literatura. De seguida, os conteúdos mais elevados cifram-se por ordem decrescente em 0.77 wt%, 0.70 wt%, 0.51 wt% e 0.38 wt% para Bailundo, Sulima-Monte Verde, Logonjo e Tchivira-Bonga e Lupongola, respectivamente. Note-se, que à excepção de Virulundo, o número de análises efectuadas é reduzido, nomeadamente para Logonjo (três análises) e Bailundo e Tchivira-Bonga (cinco). Nenhum destes complexos apresenta valores analisados de Sc e os conteúdos em Y_2O_3 para todos os complexos são ≤ 0.09 wt% (i.e. ≤ 289.67 ppm). As concentrações em ThO_2 são muito reduzidas sendo ≤ 0.02 wt% (i.e. ≤ 161.67 ppm). Os valores para o complexo carbonatítico de Coola não são aqui discutidos por corresponderem a um exemplar.

Tabela 22. Conteúdos elementares para ETR, REO e REO* para os complexos Angolanos.

		Mínimo	**Máximo**	**Média**	**Mediana**	***N***
Sulima-Monte Verde	ETR (ppm)	1682.02	7778.92	3575.54	2860.91	*7*
	REO (%)	0.39	1.82	0.84	0.67	
	REO* (%)	**0.41**	**1.87**	**0.87**	**0.70**	
	Th	16.85	788.40	161.77	44.80	
	ThO_2	0.00	0.09	0.02	0.01	
Bailundo	ETR (ppm)	753.40	6094.94	3259.76	3065.25	*5*
	REO (%)	0.18	1.42	0.76	0.72	
	REO* (%)	**0.19**	**1.51**	**0.80**	**0.77**	
	Th	2.40	233.30	85.06	27.80	
	ThO_2	0.000	0.027	0.010	0.003	
Logonjo	ETR (ppm)	2472.61	11256.84	5729.08	3457.80	*3*
	REO (%)	0.39	0.51	0.46	0.46	
	REO* (%)	**0.46**	**0.66**	**0.54**	**0.51**	
	Th	177.90	734.00	466.73	488.30	
	ThO_2	0.02	0.08	0.05	0.06	
Tchivira-Bonga	ETR (ppm)	904.16	3320.92	2092.066	2092	*5*
	REO (%)	0.21	0.77	0.49	0.49	
	REO* (%)	**0.22**	**0.85**	**0.51**	**0.51**	
	Th	2.3	11.2	7.82	8.70	
	ThO_2	0.000	0.001	0.001	0.001	
Lupongola	ETR (ppm)	140.40	2531.27	1474.35	1443.54	*8*
	REO (%)	0.03	0.59	0.34	0.34	
	REO* (%)	**0.04**	**0.64**	**0.38**	**0.38**	
	Th	0.34	91.60	16.04	1.81	
	ThO_2	0.00	0.01	0.00	0.00	
Virulundo	ETR (ppm)	1060.00	15600.00	5076.43	5030.00	*28*
	REO (%)	0.25	3.66	1.19	1.18	
	REO* (%)	**0.27**	**3.76**	**1.26**	**1.23**	
	Th	23.00	510.00	113.05	70.00	
	ThO_2	0.00	0.06	0.01	0.01	

Os resultados analíticos relativos aos complexos carbonatíticos brasileiros foram projectados no diagrama discriminante Nb-Ba-ETR (**Figura 34**), permitindo verificar uma agregação junto ao vértice (BaO+SrO+CaO+MgO). Araxá, Itapirapuã e Angico dos Dias deslocam-se no sentido do vértice ETR_2O_3, cujas distribuições de concentração em ETR_2O_3 apresentam mediana igual a 0.94 wt%, 0.57 wt% e 0.90 wt%, respectivamente, comparativamente aos restantes complexos com 0.07 wt% (Jacupiranga) e 0.14 wt% (Juquiá). Se compararmos com Bailundo_09, verificamos valores medianos de ETR_2O_3 de 0.59 wt%, próximos dos obtidos para Itapirapuã, mas distantes dos valores obtidos para Araxá e Angico dos Dias. Estes resultados corroboram os dados obtidos para os valores de REO (**Tabela 23**) que mostram-se, por ordem decrescente, mais elevados para Araxá (1.38 wt%), Itapirapuã (0.98 wt%), Angico dos Dias (0.93 wt%), Juquiá (0.14 wt%) e Jacupiranga (0.07wt%). Por conseguinte, os maiores valores medianos em REO* cifram-se em 1.18 wt% (Araxá), 0.93 wt% (Angico dos Dias), 0.59 wt% (Itapirapuã), 0.23 (Juquiá) e 0.10 (Jacupiranga). Note-se, como já referido anteriormente, que Juquiá apresenta lacunas de informação no que respeita às concentrações em ETR e ao número reduzido de exemplares analisados (*N* = 4). Os valores de concentração em ThO_2 são baixos (≤ 0.02 wt%) e as concentrações em Y_2O_3 são consistentemente ≤ 0.04 wt%.

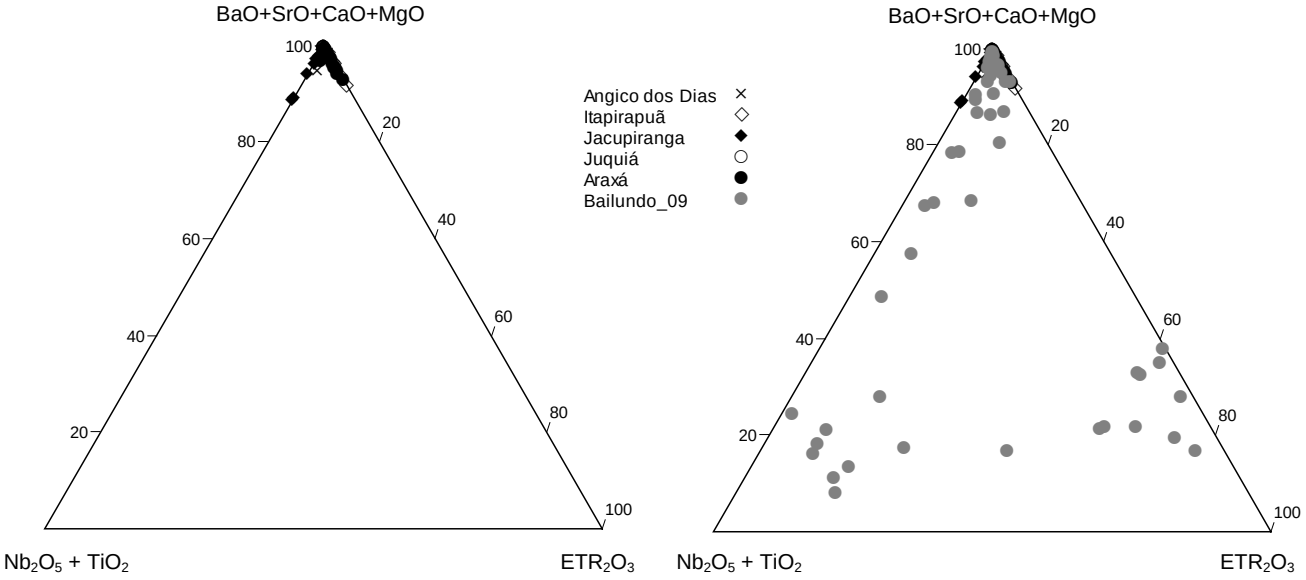


Figura 34. Projecção das características litogeoquímicas, no diagrama Nb-Ba-ETR, para Bailundo e complexos carbonatíticos brasileiros reportados na literatura por outros autores.

Tabela 23. Conteúdos elementares para ETR, REO e REO* para os complexos Brasileiros.

		Mínimo	Máximo	Média	Mediana	*N*
	ETR (ppm)	412.00	701.00	584.50	612.50	
	REO (%)	0.10	0.16	0.14	0.14	
Juquiá	**REO* (%)**	**0.13**	**0.29**	**0.22**	**0.23**	*4*
	Th	–	–	–	–	
	ThO_2	–	–	–	–	
	ETR (ppm)	77.69	526.33	303.80	301.40	
	REO (%)	0.02	0.12	0.07	0.07	
Jacupiranga	**REO* (%)**	**0.03**	**0.15**	**0.09**	**0.10**	*9*
	Th	0.32	34.40	9.40	5.25	
	ThO_2	0.000	0.004	0.001	0.001	
	ETR (ppm)	154.97	16693.90	4179.61	2430.51	
	REO (%)	0.04	3.91	0.98	0.57	
Itapirapuã	**REO* (%)**	**0.05**	**3.94**	**1.02**	**0.59**	*15*
	Th	7.90	4164.00	456.29	139.50	
	ThO_2	0.00	0.47	0.05	0.02	
	ETR (ppm)	2670.97	5702.27	3979.05	3867.71	
	REO (%)	0.62	1.33	0.93	0.90	
Angico dos Dias	**REO* (%)**	**0.65**	**1.37**	**0.96**	**0.93**	*16*
	Th	8	38.27	15.89	13.74	
	ThO_2	0.001	0.004	0.002	0.002	
	ETR (ppm)	1736.73	16906.03	5899.96	4034.09	
	REO (%)	0.41	3.96	1.38	0.94	
Araxá	**REO* (%)**	**0.45**	**3.99**	**1.42**	**1.18**	*17*
	Th	33.10	744.00	169.26	111.00	
	ThO_2	0.00	0.08	0.02	0.01	

Ensaio comparativo das assinaturas petrogenéticas de Bailundo, Angola e Brasil

Tomando como referência os dados publicados na literatura para os complexos carbonatíticos angolanos (Bailundo, Sulima-Monte Verde, Coola, Virulundo, Lupongola, Logonjo e Tchivira-Bonga) e brasileiros (Angico dos Dias, Araxá, Juquiá, Jacupiranga e Itapirapuã), apresentados na secção anterior, tentar-se-á estabelecer um ensaio comparativo das assinaturas petrogenéticas deste complexo com as obtidas para Bailundo.

A distribuição de concentração em ETR normalizados ao condrito (Palme & Jones, 2003) para os complexos carbonatíticos angolanos (**Figura 39** e **40**) e brasileiros (**Figuras 37** e **38**) revelam enriquecimentos em ETR, nomeadamente em ETRL, tal como é verificado para Bailundo. O fraccionamento médio das ETRL em relação às ETRP tipificado pela razão $[La/Yb]_{CN}$, de entre os carbonatitos brasileiros (**Figura 35**), é mais elevado para Araxá (190.97) relativamente aos restantes complexos (146.32, Angico dos Dias; 131.09, Itapirapuã; 38.19, Jacupiranga; e 5.11,

Juquiá). Para os carbonatitos angolanos (**Figura 36**) os valores apresentam-se mais elevados para Sulima-Monte Verde (82.10), Bailundo (72.79), Logonjo (55.27), Tchivira-Bonga (34.67) e Lupongola (34.12), não sendo possível realizar o cálculo para Virulundo por insuficiência de dados analíticos.

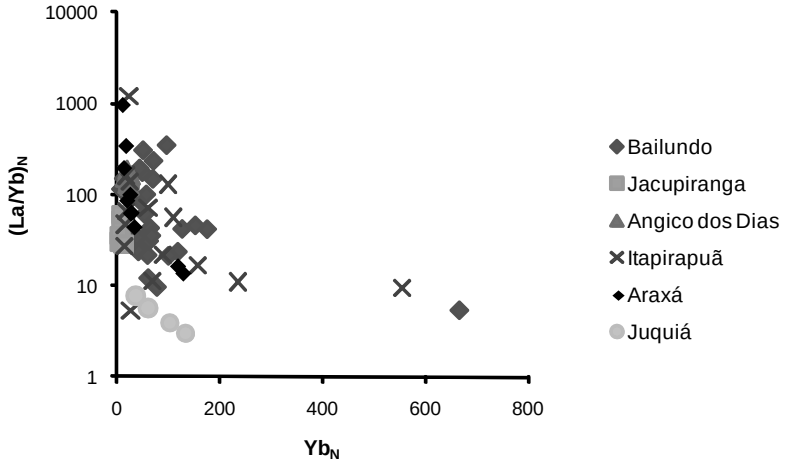


Figura 35. Variação da razão La/Yb_{Cn} em função do Yb_{Cn} para Bailundo e complexos carbonatíticos brasileiros.

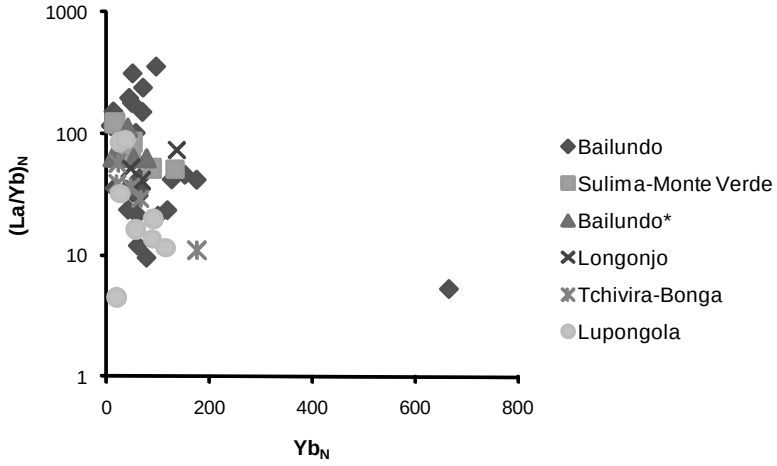


Figura 36. Variação da razão La/Yb_{Cn} em função do Yb_{Cn} para Bailundo e complexos carbonatíticos angolanos; Bailundo* refere-se aos dados compilados por Alberti *et al*. (1999) para este complexo.

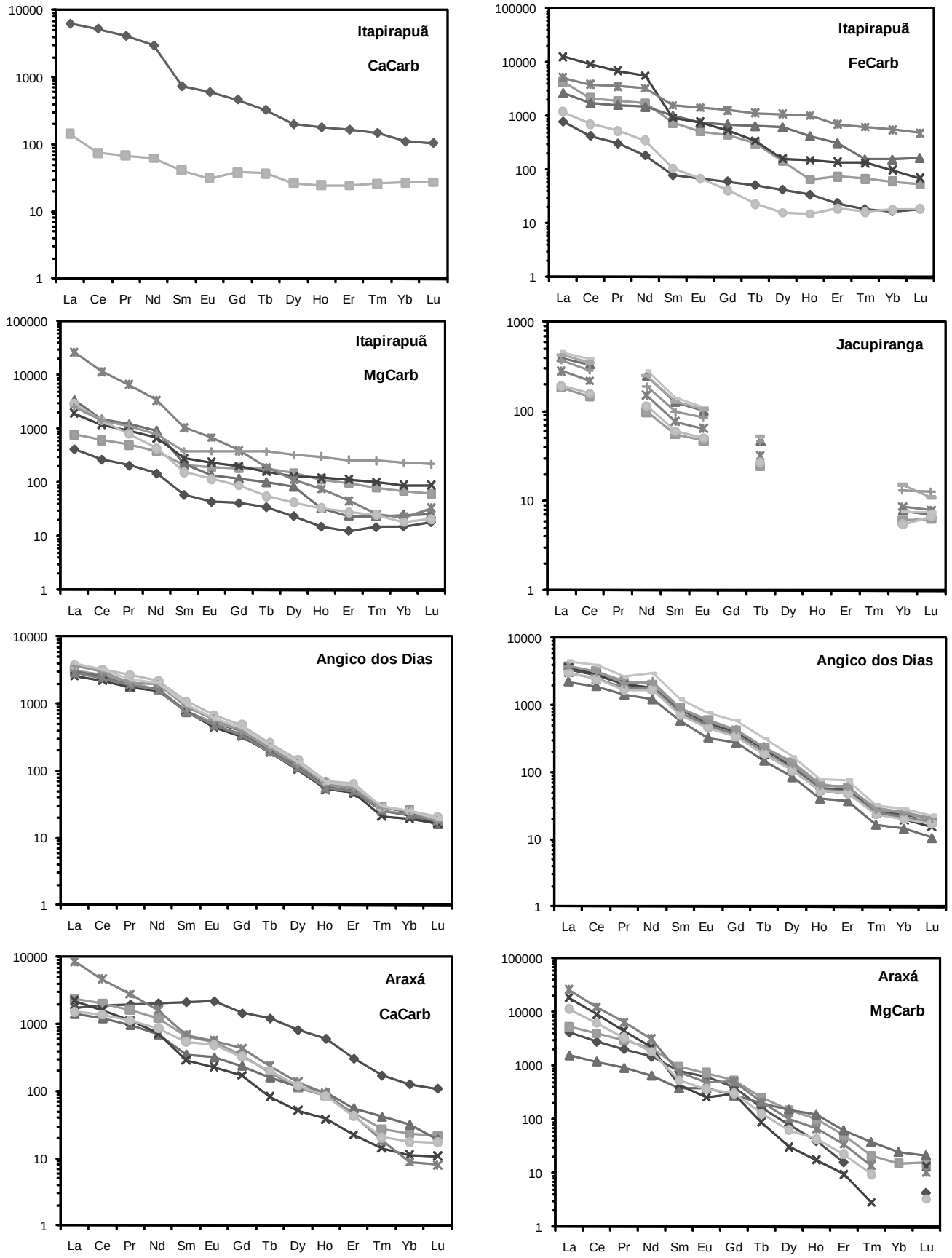


Figura 37 . Padrões de concentração em ETR normalizados relativamente ao condrito (Palme & Jones, 2003) para os complexos carbonatíticos do Brasil. MgCarb – magnésio-carbonatitos; CaCarb – cálcio-carbonatitos; FeCarb – ferro-carbonatitos.

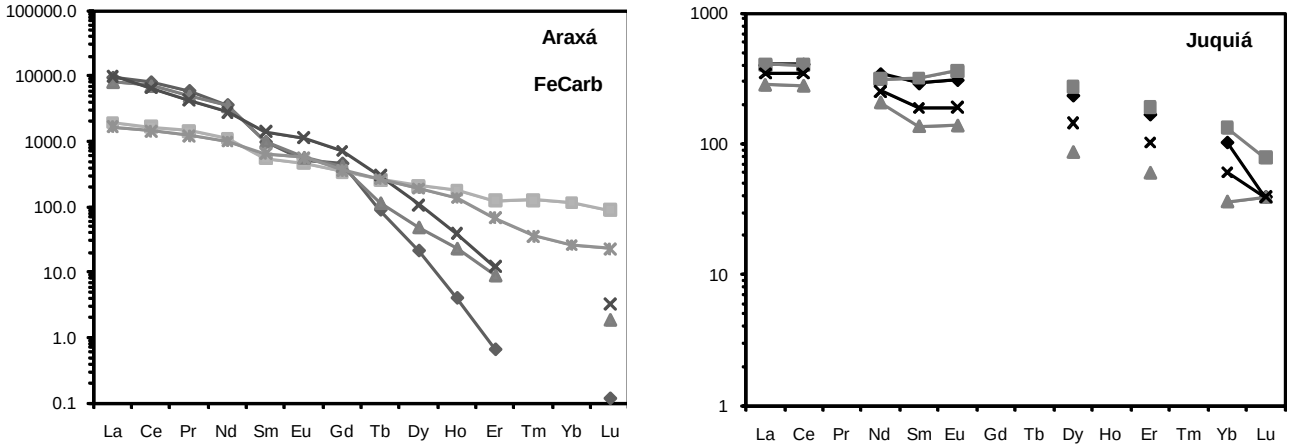


Figura 38 . Padrões de concentração em ETR normalizados relativamente ao condrito (Palme & Jones, 2003) para os complexos carbonatíticos do Brasil. FeCarb – ferro-carbonatitos.

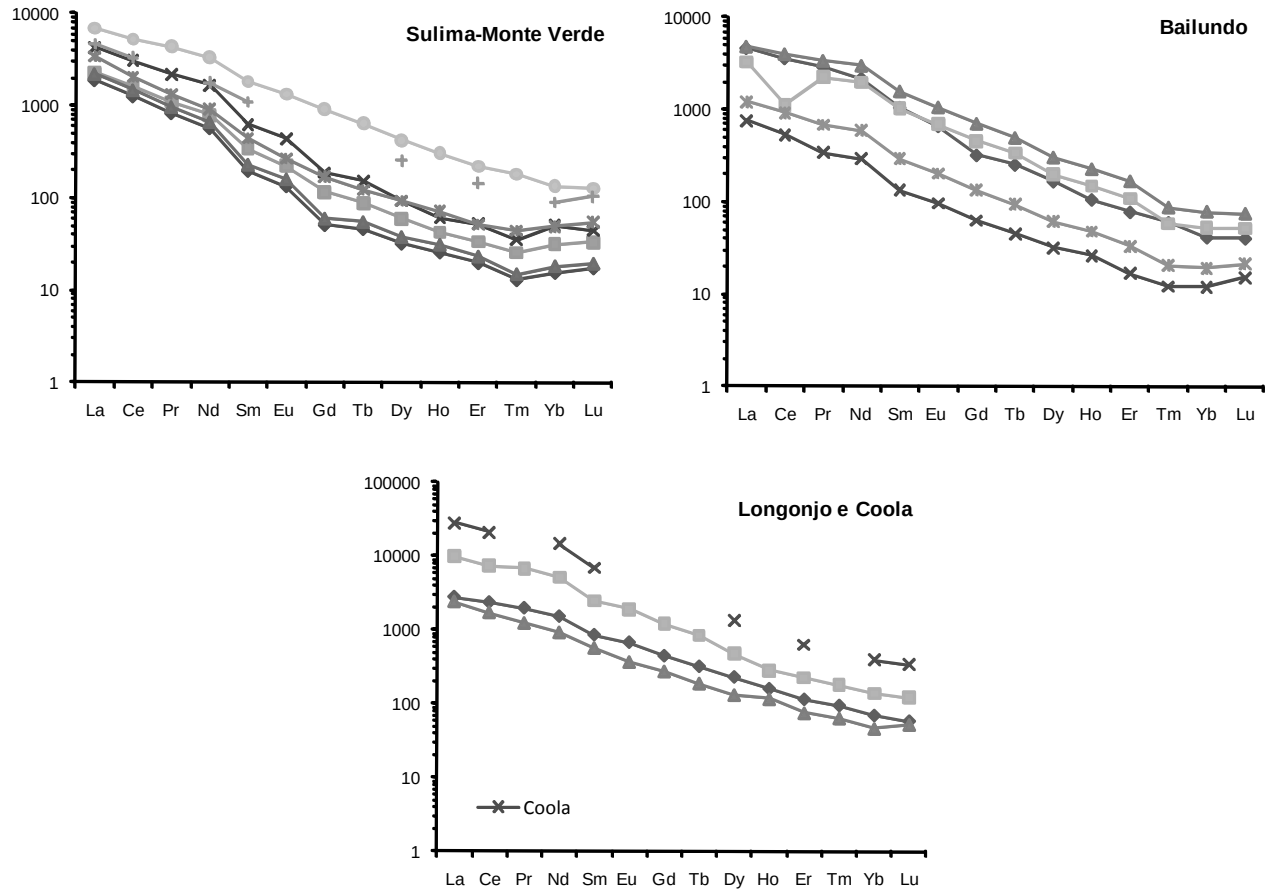


Figura 39. Padrões de concentração em ETR normalizados relativamente ao condrito (Palme & Jones, 2003) para os complexos carbonatíticos de Angola.

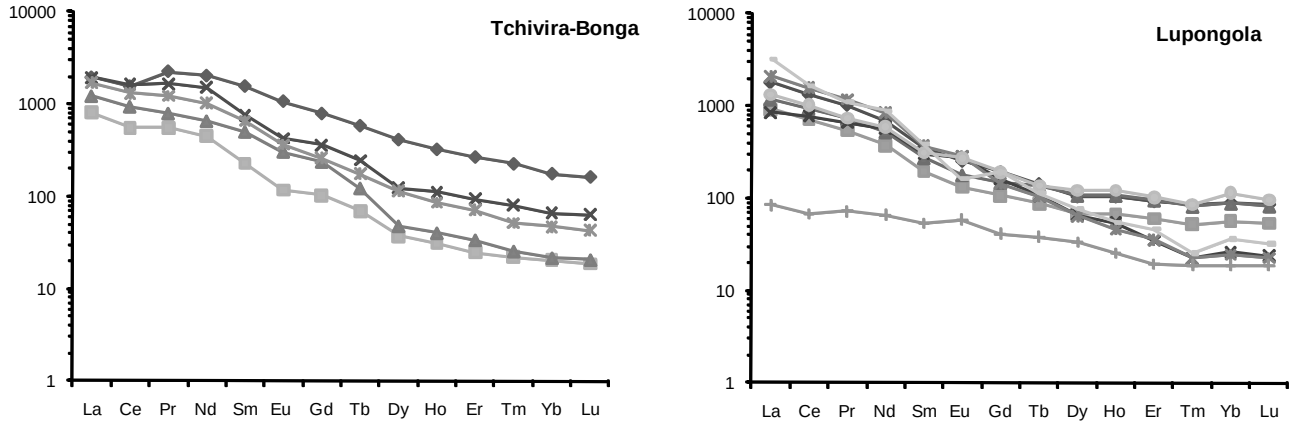


Figura 40. Padrões de concentração em ETR normalizados relativamente ao condrito (Palme & Jones, 2003) para os complexos carbonatíticos de Angola.

Os padrões de concentração em elementos incompatíveis normalizados relativamente ao manto primitivo para Angola (**Figura 45** e **46**) e Brasil (**Figuras 43** e **44**) continuam a mostrar padrões apiciformes para a maioria dos elementos LILE e HFSE, contrariamente ao que acontece com o Y, ETRI (Tb) e ETRP (Yb e Lu), com padrões mais suaves. Quanto aos ETR, continuam a mostrar elevadas concentrações em ETRL (La-Ce) comparativamente aos ETRP (Yb-Lu). De salientar os enriquecimentos relativos em BaO e SrO para Bailundo, cujas distribuições de concentração apresentam 18.3 wt% e 3.07 wt%, respectivamente como valores máximos, contrastantes com os dados relatados em Alberti *et al*. (1999) para carbonatitos angolanos, os quais apontam para 2.83 wt% de SrO (Sulima-Monte Verde), 5.76 wt% BaO (Lupongola) e 0.20 wt% BaO (Bailundo). Os valores determinados para Bailundo no presente estudo revelam-se também acima do indicado para os complexos carbonatíticos brasileiros: para SrO, referem-se conteúdos máximos de 1 wt% (Juquiá), 0.03 wt% (Jacupiranga) e 1.03 wt% (Barra do Itapirapuã); para BaO, declaram-se teores máximos de 4.67 wt% (Araxá), 1.4 wt% (Juquiá), 0.09 wt% (Jacupiranga) e 1.71 wt% (Itapirapuã). Araxá é o único complexo com valores máximos de SrO acima dos referidos para Bailundo, com 3.62 wt%.

Os empobrecimentos registados em Rb, K, Zr-Hf e Ti, por vezes bem marcados, são também característicos dos complexos angolanos (inclusivé Bailundo) e brasileiros. O Th e U apresentam comportamento similar, mostrando variações de concentração e, por vezes, anomalias negativas em Th (Lupongola e um exemplar de magnésio-carbonatito em Araxá). O P apresenta anomalias negativas pronunciadas para todos os complexos, excepto para os complexos brasileiros Jacupiranga e Juquiá (que incluem alguns exemplares com anomalias positivas) e para o complexo de Bailundo (Angola).

A elevada fraccionação Nb/Ta que se verifica em Bailundo, nos carbonatitos brasileiros apenas se observa para o complexo carbonatítico de Araxá, que não dispõe sequer de análises

com valores de Ta (possivelmente abaixo do limite de detecção do método analítico usado). Esta característica, similar para ambos os complexos, advém da existência de abundantes fases do grupo do pirocloro ricas em Nb responsáveis pelo fraccionamento elevado deste elemento comparativamente ao Ta. Para os carbonatitos angolanos, reportados por Alberti *et al.* (1999), apenas não se verifica esta fraccionação para Bailundo e Tchivira-Bonga; em Bailundo, esta situação pode dever-se a possível sub-amostragem, não esquecendo que apenas foram analisados por Alberti *et al.* (1999) cinco exemplares. Na **Figura 41** é possível observar a variação da razão Nb/Ta em função da concentração em Nb, onde se verifica que Bailundo apresenta a maior fraccionação com razões acima do manto primitivo (17). Angico dos Dias é o complexo com menor fraccionação, abaixo do valor do manto primitivo, pois apresenta conteúdos médios em Nb de 1.09 ppm, muito inferiores relativamente aos restantes complexos com 90.22 ppm (Jacupiranga), 129.30 ppm (Itapirapuã), 100.62 ppm (Araxá) e 14.75 ppm (Juquiá); os complexos carbonatíticos de Araxá e Juquiá não foram projectados por não apresentarem valores Ta. Na **Figura 42** verifica-se que Bailundo é o complexo angolano com maior fraccionação Nb-Ta e, estabelecendo comparação com os carbonatitos brasileiros (**Figura 41**), verificam-se maiores razões Nb/Ta sempre acima do manto primitivo.

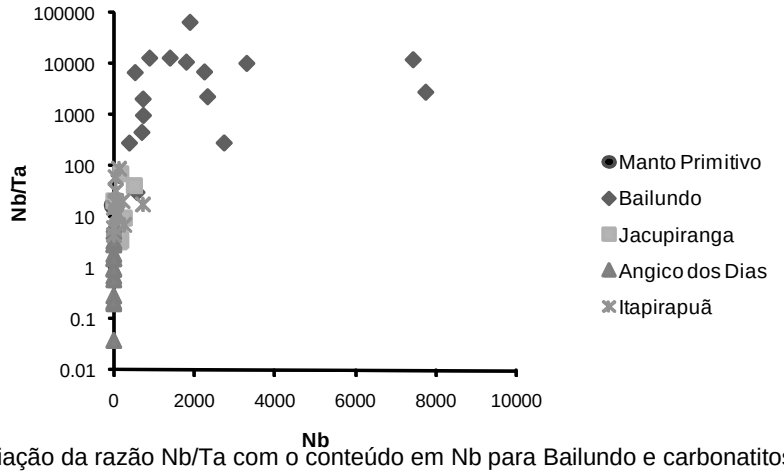


Figura 41. Variação da razão Nb/Ta com o conteúdo em Nb para Bailundo e carbonatitos brasileiros.

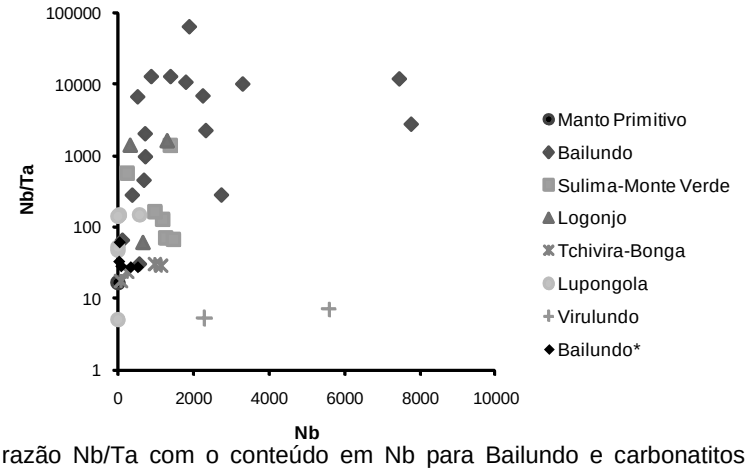


Figura 42. Variação da razão Nb/Ta com o conteúdo em Nb para Bailundo e carbonatitos angolanos; Bailundo* diz respeito aos dados reportados por Alberti *et al.* (1999) para este complexo.

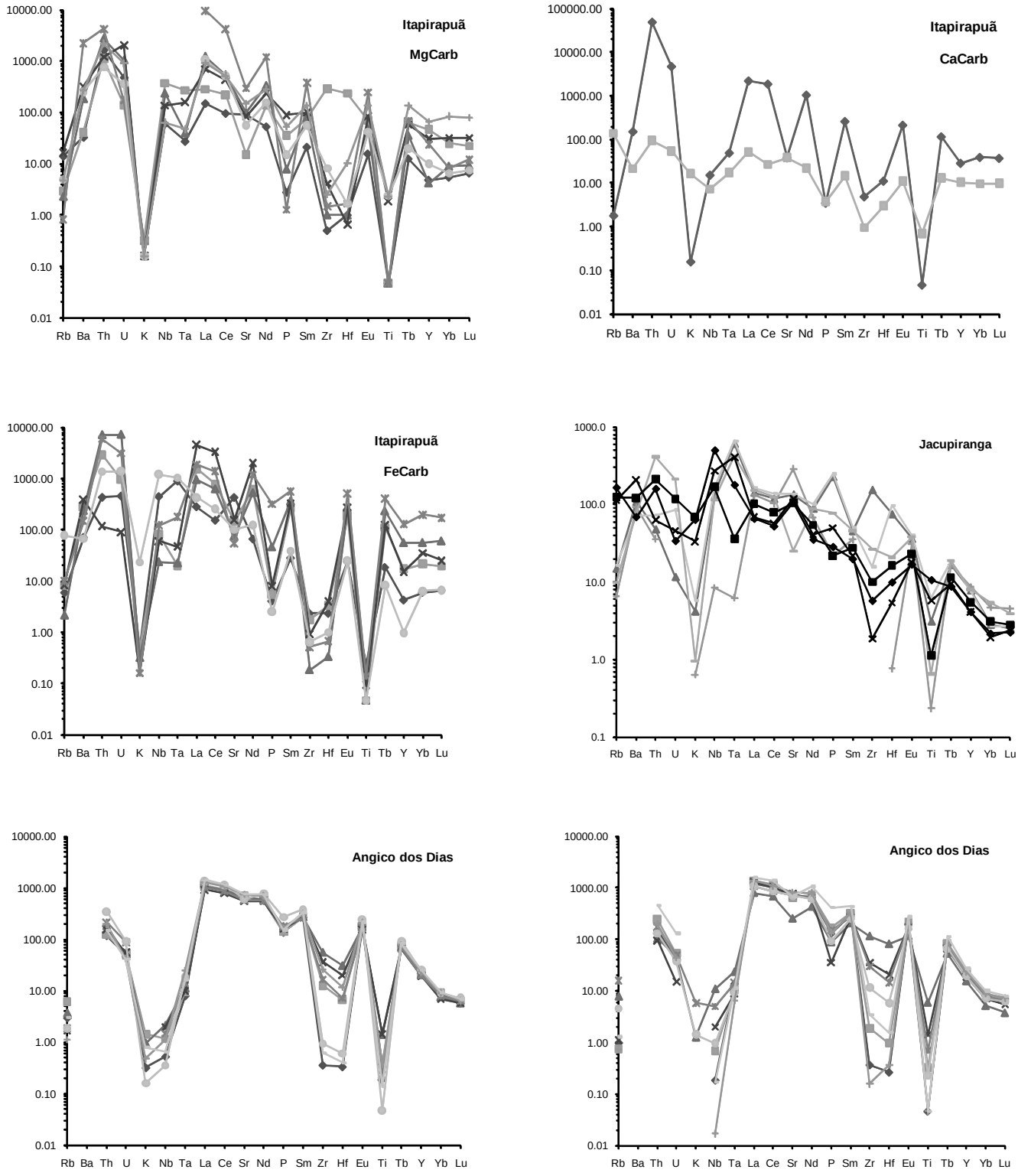


Figura 43. Padrões de concentração multi-elementar normalizados relativamente ao manto primitivo (Plame & O'Neill, 2003) para os complexo carbonatíticos Brasileiros. MgCarb – magnésio-carbonatitos; CaCarb – cálcio-carbonatitos; FeCarb – ferro-carbonatitos.

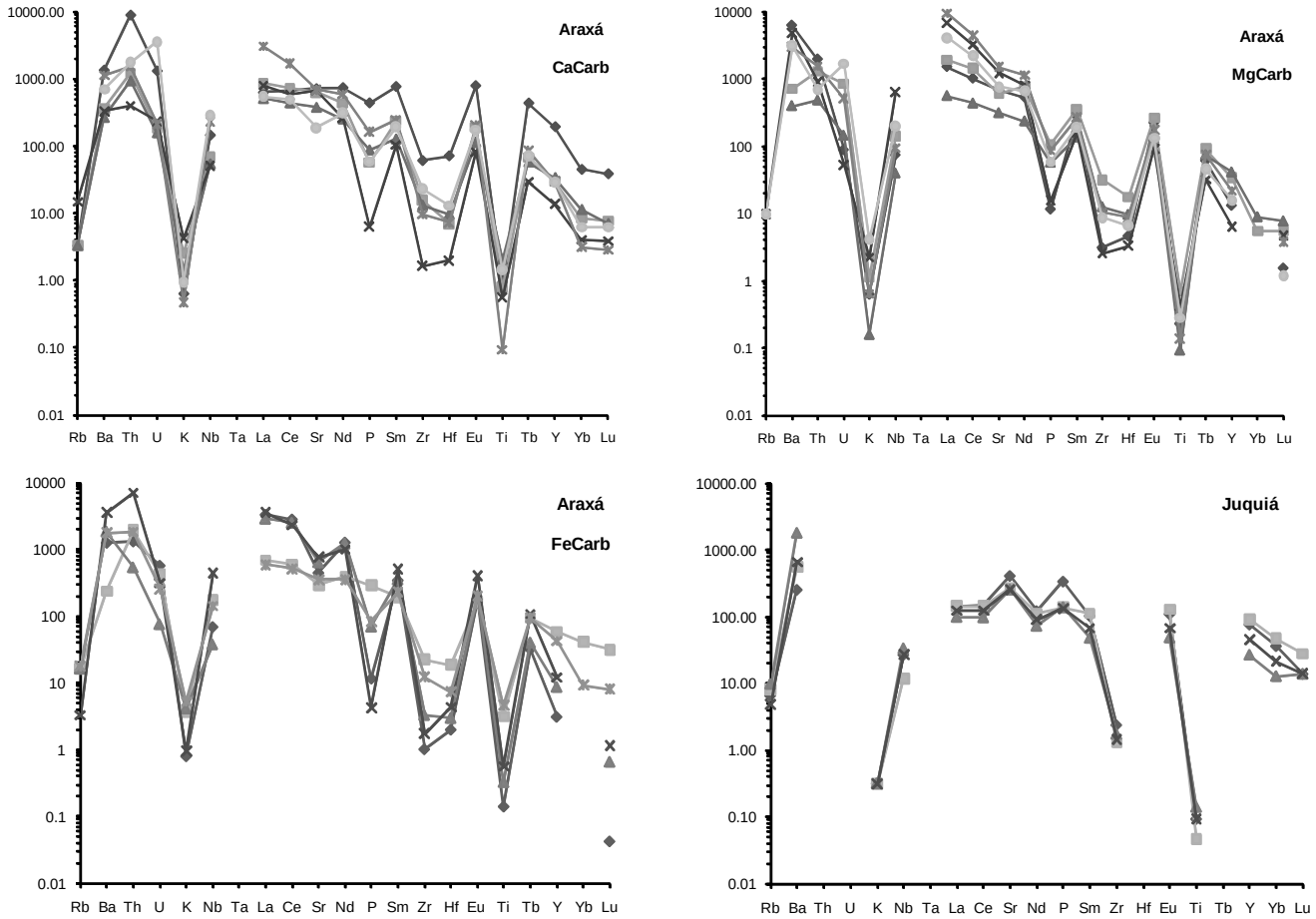


Figura 44. Padrões de concentração multi-elementar normalizados relativamente ao manto primitivo (Plame & O'Neill, 2003) para os complexo carbonatíticos Brasileiros. MgCarb – magnésio-carbonatitos; CaCarb – cálcio-carbonatitos; FeCarb – ferro-carbonatitos.

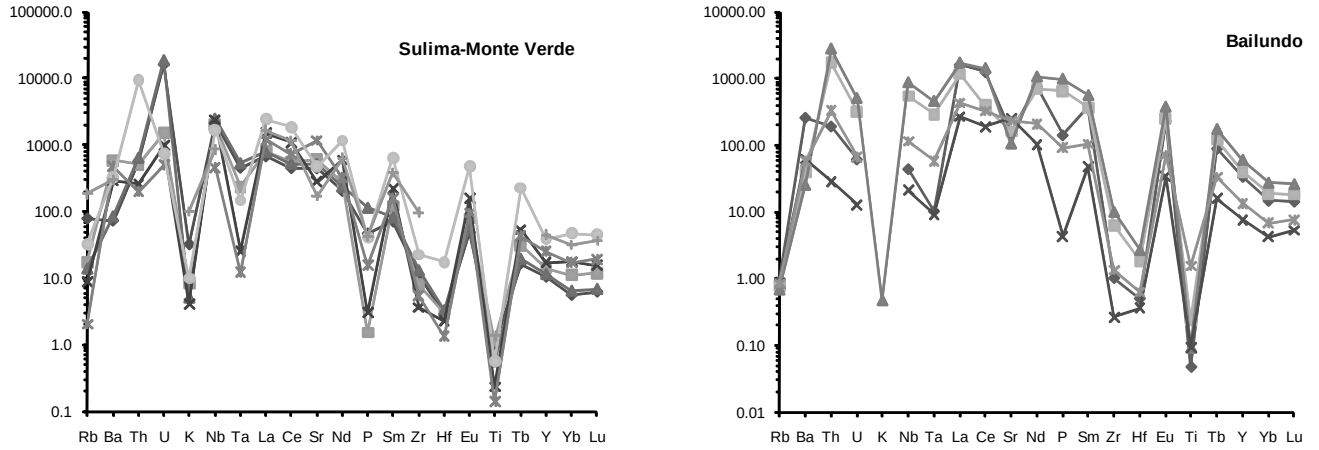


Figura 45. Padrões de concentração multi-elementar normalizados relativamente ao manto primitivo (Palme & O'Neill, 2003) para os complexos carbonatíticos de Angola.

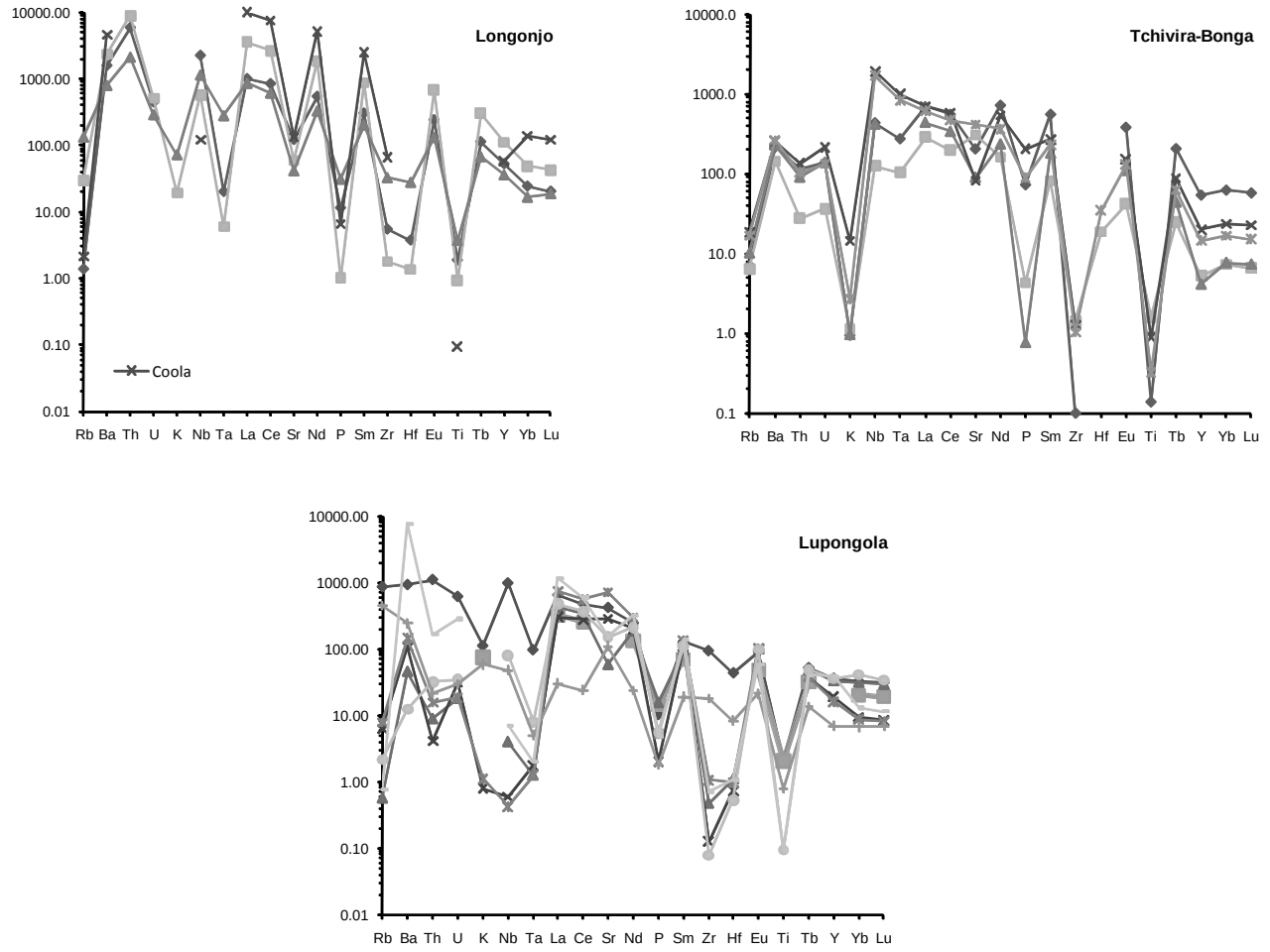


Figura 46. Padrões de concentração multi-elementar normalizados relativamente ao manto primitivo (Palme & O'Neill, 2003) para os complexos carbonatíticos de Angola; por apresentar apenas um exemplar, o complexo carbonatítico de Coola encontra-se projectado juntamente com Longonjo.

O comportamento do Zr-Hf é similar para os complexos angolanos e brasileiros. Para os carbonatitos angolanos os valores médios cifram-se, por ordem crescente, em 1.90 (Tchivira-Bonga), 35.13 (Lupongola), 47.43 (Logonjo), 87.17 (Bailundo) e 106.01 (Sulima-Monte Verde). De notar que os valores de Tchivira-Bonga não devem ser representativos uma vez que existem lacunas de informação nos conteúdos em Hf e Zr. O valor médio (*cálcio-carbonatitos* + *ferro-carbonatitos*) obtido para Bailundo (47.6) neste trabalho é significativamente inferior ao calculado por Alberti *et al*. (1999), pelo que mais uma vez a sub-amostragem pode ser factor fortemente condicionante nesta abordagem comparativa. Para todos os complexos, excepto Tchivira-Bonga e Lupongola, os valores são superiores ao definido para o manto primitivo (36), como se pode verificar na **Figura 47**. Para os complexos carbonatíticos brasileiros, os valores médios mais elevados (**Figura 48**) são reportados pelo complexo de Angico dos Dias (61.81), seguido de Itapirapuã (46.75), Araxá (43.17) e Jacupiranga (30.20). À semelhança do que acontece com a

razão Nb/Ta, a razão Zr/Hf de Araxá e Bailundo é próxima (43.17 e 47.6, respectivamente) podendo indicar uma origem similar para as mineralizações contidas nestes dois complexos. Para Juquiá não foi possível calcular devido a lacunas de informação.

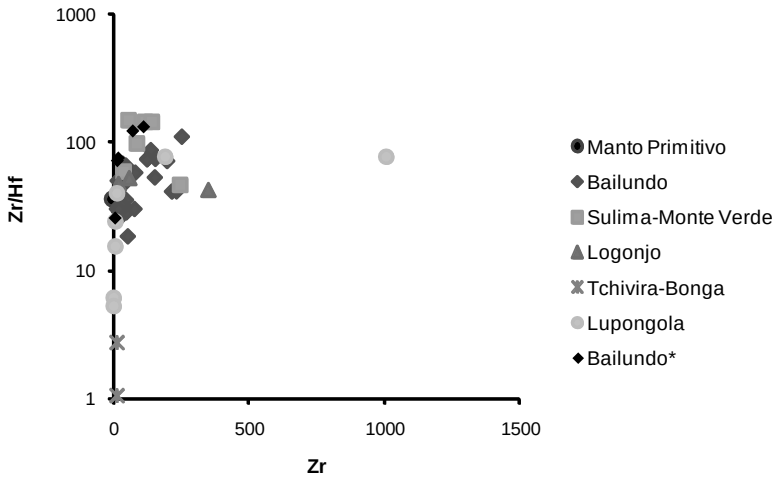


Figura 47. Variação da razão Zr/Hf com o conteúdo em Zr para Bailundo e carbonatitos angolanos; Bailundo* diz respeito aos dados reportados por Alberti *et al.* (1999) para este complexo.

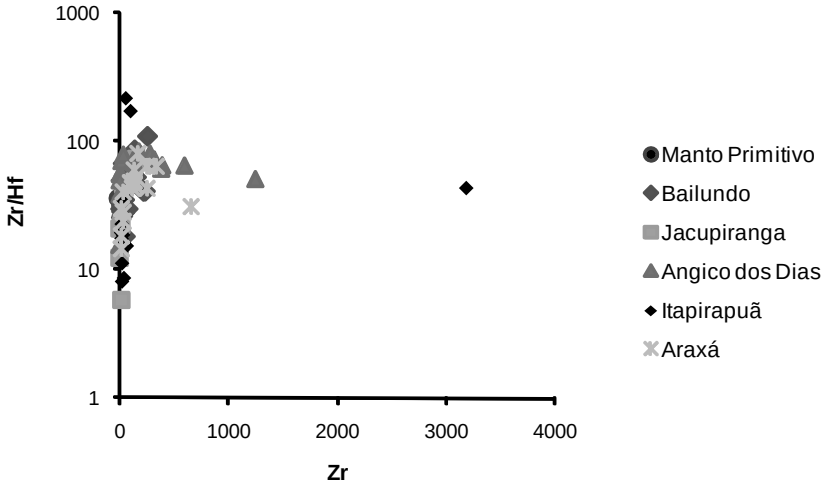


Figura 48. Variação da razão Zr/Hf com o conteúdo em Zr para Bailundo e carbonatitos brasileiros.

CAPÍTULO VIII
CONCLUSÕES

O Complexo Carbonatítico de Bailundo, com uma morfologia típica de estrutura anelar, é constituído por um anel periférico sobrelevado cujo substrato compreende rochas feníticas e um domínio central constituído por rochas carbonatíticas (*cálcio-carbonatitos* e *ferro-carbonatitos*). Em termos gerais, os *fenitos* e *carbonatitos* examinados revelam textura e natureza composicional relativamente heterogénea que reflecte a sobreposição de transformações desencadeadas por processos tardi-magmáticos e hidrotermais, subsequentemente intensificados pela meteorização química. Estes processos afiguram-se cruciais no desenvolvimento de associações minerais singulares que, com frequência constituem disseminações matriciais tardias e preenchimentos de veios, filonetes venulações; tal é o caso dos minerais portadores de ETR como flúor-carbonatos (parisite), fosfatos (rabdofanite e apatite) e óxidos (pirocloro e cerianite). Estas fases minerais em conjunto com outras fases minerais, descritas em trabalhos anteriores (e.g. Santos, 2010), portadoras de metais de interesse, tornam o CCB um complexo polimetálico Fe-Nb-ETR (Ba) com elevado potencial metalogenético.

A avaliação do potencial económico em [ETR+Y+Sc] (= REO*) revela conteúdos medianos elementares mais elevados para os *ferro-carbonatitos* com 0.81 wt% ($\bar{x}$ = 1.26 wt%), seguido dos *cálcio-carbonatitos* 0.64 wt% ($\bar{x}$ = 1.16 wt%) e *fenitos* 0.33 wt% ($\bar{x}$ = 0.75 wt%); as anomalias em ETR desenvolvem-se nomeadamente no sector central e SW dos *ferro-carbonatitos* e nas faixas de transição para os *cálcio-carbonatitos*.

Nos *ferro-carbonatitos* os minerais responsáveis pelos conteúdos em ETR são Ba-pirocloro, a rabdofanite e a cerianite. O pirocloro ocorre em cristais euédricos disseminados na matriz com conteúdos medianos em ETR_2O_3 de 1.57 wt%; a cerianite ocorre com dimensões muito reduzidas

disseminados na matriz com conteúdos em ETR_2O_3 de 64.4 wt% com predomínio claro do Ce (56.3 wt%); os minerais do grupo da rabdofanite [brockite, rabdofanite-(Ce), rabdofanite-(Nd)] ocorrem em disseminações matriciais tardias e preenchimentos de redes anastomosadas de veios, filonetes e venulações apresentando conteúdos em ETR_2O_3 variáveis entre 21.2 e 61.2 wt% (ETRL – 44.13 wt% e ETRP – 3.56 wt%).

Nos *cálcio-carbonatitos* os conteúdos em ETR são justificados pela presença de Ba-pirocloro, pirocloro, apatite e parisite. O pirocloro e apatite ocorrem de forma disseminada na matriz, integrando o pirocloro também associações minerais que constituem o preenchimento dos veios/filonetes tardios dominados por quartzo; a parisite constitui agregados de grão fino e morfologia radial e fibrosa, disseminados na matriz e ocorre intercrescida com outros flúor-carbonatos cuja identificação não foi possível mercê da granularidade muito fina dos intercrescimentos; os pirocloros e a apatite apresentam conteúdos medianos em ETR_2O_3 de 1.05 wt% e 0.84 wt%, respectivamente; a parisite apresenta conteúdos medianos de 44.8 wt% (ETRL – 43.9 wt% e ETRP – 0.76 wt%).

Nos *fenitos* os minerais de ETR são representados por apatite e pirocloro. As apatites denotam conteúdos medianos em ETR_2O_3 de 0.80 wt% e o pirocloro de 1.13 wt%.

O pirocloro e a apatite revelaram quantidades traço em ETR, contrariamente às restantes fases minerais (rabdofanite, cerianite e parisite) que são as principais portadoras dos mesmos. No entanto, o pirocloro revelou ser potencial portador de outros elementos como o Nb e o Ba com conteúdos medianos em Nb de 67.57 wt% (*ferro-carbonatitos*), 69.57 wt% (*cálcio-carbonatitos*) e 64.95 wt% (*fenitos*); os conteúdos medianos em Ba cifram-se em 19.16 (*ferro-carbonatitos*) e 14.1 wt% (*cálcio-carbonatitos*). De forma geral, para todas as litologias, ocorre predomínio claro dos ETRL sobre os ETRP com destaque para o La e Ce; os enriquecimentos em ETR são maiores nos *ferro-carbonatitos* como seria de esperar, visto corresponderem à litologia mais diferenciada.

Para o Th foram calculados valores médios de 0.07 wt% para os *ferro-carbonatitos* e 0.03 wt% para os *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*. Estes valores não são muito distantes dos calculados para o Y (0.1 wt%, 0.05 wt% e 0.04 wt%, para os *ferro-carbonatitos*, *cálcio-carbonatitos* e *fenitos*, respectivamente) e Sc (0.01 wt% para os *ferro-carbonatitos* e *cálcio-carbonatitos* e 0.002 wt% para o *fenitos*), não revelando potencial económico de interesse.

A observação petrográfica em conjunto com os resultados de química mineral permitiram identificar três tipologias de mineralização: (i) mineralizações primárias tipificadas pela fase pirocloro, (ii) magmático-hidrotermais tipificadas pelo desenvolvimento de Ba-pirocloro, parisite e apatite e (iii) supergénicas (hidrotermais?) tipificadas pelo desenvolvimento de cerianite e rabdofanite.

Em termos geoquímicos, com base nos resultados analíticos publicados e até ao momento compilados, existem diferenças composicionais assinaláveis no que respeita aos ETR entre os complexos carbonatíticos angolanos e brasileiros. Estas diferenças devem traduzir os efeitos

resultantes dos processos tardi- a pós-magmáticos (metassomáticos e de alteração hidrotermal) a que as diferentes rochas foram sujeitas.

Para os carbonatitos angolanos, os conteúdos medianos em REO* são mais elevados para Virulundo com 1.23 wt% ($\bar{x}$ = 1.26 wt%; embora este valor contemplar apenas o La e Ce), seguindo-se por ordem decrescente em 0.77 wt% ($\bar{x}$ = 0.80 wt%), 0.70 wt% ($\bar{x}$ = 0.87 wt%), 0.51 wt% ($\bar{x}$ = 0.54 wt%), 0.51 wt% ($\bar{x}$ = 0.51 wt%) e 0.38 wt% ($\bar{x}$ = 0.38 wt%) para Bailundo, Sulima-Monte Verde, Logonjo, Tchivira-Bonga e Lupongola, respectivamente. Nenhum destes complexos apresenta valores analisados de Sc e os conteúdos em Y_2O_3 para todos os complexos são ≤ 0.09 wt% (i.e. ≤ 289.67 ppm). As concentrações em ThO_2 são muito reduzidas, sendo ≤ 0.02 wt% (i.e. ≤ 161.67 ppm). Excepto para Logonjo, Tchivira-Bonga e Lupongola, os valores são próximos dos obtidos para Bailundo, no entanto acresce referir que, à excepção de Virulundo, o número de análises efectuadas é reduzido, nomeadamente para Logonjo (três análises) e Bailundo e Tchivira-Bonga (cinco).

Para os carbonatitos brasileiros, à excepção de Juquiá, o banco de dados disponível parece ser suficiente para interpretações fidedignas. Os maiores valores medianos em REO* cifram-se em 1.18 wt% (Araxá, $\bar{x}$ = 1.42 wt%), 0.93 wt% (Angico dos Dias, $\bar{x}$ = 0.96 wt%), 0.59 wt% (Itapirapuã, $\bar{x}$ = 1.02 wt%), 0.23 (Juquiá, $\bar{x}$ = 0.22 wt%) e 0.10 (Jacupiranga, $\bar{x}$ = 0.09 wt%). Note-se, como já referido anteriormente, que Juquiá apresenta lacunas de informação no que respeita às concentrações em ETR e ao número reduzido de exemplares analisados (*N* = 4). Os valores de concentração em ThO_2 são baixos (≤ 0.02 wt%) e as concentrações em Y_2O_3 são consistentemente ≤ 0.04 wt%.

Os padrões de concentração normalizados em elementos menores e traço revelam forte consistência com a distribuição e abundância das fases minerais portadoras em ETR reconhecidas petrograficamente, assim como a natureza composicional, apreciada com base em análises químicas pontuais de microssonda electrónica. A distribuição de concentração em ETR normalizados relativamente ao condrito revela forte enriquecimento em ETRL denunciada pela elevada fraccionação ETRL/ETRP das rochas carbonatíticas. A elevada fraccionação parece estar relacionada com os processos de natureza hidrotermal responsáveis pela formação das fases óxidas, fosfatadas e flúor-carbonatadas portadoras de ETR.

A assinatura dos LILE é semelhante em todas as litologias mostrando elevados conteúdos em Ba, pronunciadas anomalias negativas em Rb e K. O Ba, de entre os LILE apresenta o maior grau de enriquecimento devendo-se à presença abundante de Ba-pirocloro, para além da presença menos acentuada de barite. Processos de alteração hidrotermal são responsáveis pela incorporação dessas quantidades de Ba. Tal como o Ba, o Sr apresenta conteúdos elevados, ainda que significativamente mais baixos, similares aos valores evidenciados para os outros carbonatitos

independentemente do local de origem. A assinatura dos HFSE apresenta também comportamento similar para as três litologias, sendo característicos os conteúdos elevados em ETR, nomeadamente em ETRL (La-Ce). Anomalias positivas bem marcadas são observadas para o Nd sendo atribuído à incorporação deste elemento nas fases portadoras de ETR. Os valores supramantélicos do par Zr/Hf e Nb/Ta são congruentes com o metassomatismo carbonatítico. Contrariamente ao esperado, a razão Zr/Hf não se mostra mais elevada nas litologias mais diferenciadas (*ferro-carbonatitos*), pelo que pode ser atribuído a uma contribuição magmática ou tardi-magmática. A fraccionação Nb/Ta é extremamente elevada caracterizada por anomalias marcadamente positivas e negativas para o Nb e Ta, respectivamente. As elevadas fraccionação deste par é atribuída ao desenvolvimento de pirocloro.

O exame comparativo da assinatura petrogenética do CCB com as informações publicadas para os complexos carbonatíticos de Angola e Brasil confirma a potencialidade de Bailundo em ETR relativamente a alguns complexos carbonatíticos angolanos (Sulima-Monte Verde, Logonjo, Tchivira-Bonga e Lupongola) e brasileiros (Juquiá e Jacupiranga). Virulundo (complexo carbonatítico angolano) e Itapirapuã, Angico dos Dias e Araxá (complexos carbonatíticos brasileiros) mostram conteúdos em ETR próximos e, por vezes superiores (e.g. Araxá e Virulundo) aos obtidos para Bailundo. A distribuição de concentração normalizada em ETR relativamente ao condrito para os complexos angolanos e brasileiros revela, tal com para Bailundo, forte enriquecimento em ETR, nomeadamente ETRL. Os padrões de concentração em elementos incompatíveis mostram assinaturas geoquímicas semelhantes às obtidas para Bailundo, destancando-se diferenças nos valores de BaO e SrO, mais elevadas para Bailundo que nos restantes complexos (angolanos e brasileiros), com excepção de Araxá que apresenta valores de SrO mais elevados. A elevada fraccionação Nb/Ta apenas se observa para os carbonatitos angolanos, incluindo Bailundo (excepto Tchivira-Bonga), e para o carbonatito brasileiro de Araxá.

Sugestões de trabalho futuro

Os dados compilados neste trabalho indicam que se afigura indispensável continuar a desenvolver trabalhos de investigação detalhados com vista à compreensão dos processos petrogenéticos responsáveis pela génese dos domínios mineralizados do CCB, tornando-se crucial na correcta avaliação do seu potencial metalogenético e significado geodinâmico.

No que respeita aos minerais de ETR, ao longo deste trabalho ficou expressa a dificuldade na sua determinação fidedigna, pelo que é importante continuar o trabalho detalhado destas paragéneses tardias (e.g. microssonda electrónica, difracção de RX) responsáveis pelo potencial metalífero nestes elementos. A elevada meteorização das amostras assim como a silicificação intensa que se faz sentir, dificulta as análises, pelo que seria importante trabalhar com amostras menos alteradas (e.g. sondagens). O estudo dos depósitos eluvionares adjacentes aos

carbonatitos é importante, na medida em que é expectável conterem concentrações metalíferas de interesse.

A realização de análises de isótopos radiogénicos afigura-se indispensável para a (i) conceptualização de um modelo petrogenético que permita compreender a idade relativa dos processos de acumulação dos minerais relativamente aos fenómenos tardi-magmáticos; (ii) determinar a natureza dos fluidos responsáveis pelo desenvolvimento da mineralização em ETR e (iii) datar os processos mineralizantes que envolveram por esses fluidos.

O reconhecimento de novas zonas passíveis de encerrar concentrações anómalas em ETR é importante e é possível, não só através do reconhecimento cartográfico, mas também através da utilização de metodologias geofísicas como campanhas de magnetometria e gravimétricas.

CAPÍTULO IX
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

Antonini P, Comin-Chiaramonti P, Gomes CB, Censi P, Riffel BF, Yamamoto E (2003) – The early Proterozoic carbonatite complex of Angico dos Dias, Bahia State, Brazil: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence for an enriched mantle origin. *Mineralogical Magazine*, **67(5)**: 1039-1057.

Araújo AG, Guimarães F [Coords.] (1992) – Notícia explicativa da Carta Geológica de Angola à escala 1:1.000 000. Serviço Geológico de Angola, Luanda, 135 pp.

Alberti A, Castorina F, Censi P, Comin-Chiaramonti P, Gomes CB (1999) – Geochemical characteristics of Cretaceous carbonatites from Angola. *Journal of African Earth Sciences* **29**: 735–759.

B

Bambi AJCM, Costanzo A, Melgarejo JC, Gonçalves AO, Alfonso P, Neto AB, Manuel J (2008) – Evolution of pyrochlore in carbonatites: the Angola Case. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogia*, Macla nº 9, pp. 43-44.

Beleque ARC, Santos PRA, Mateus AMN (2009a) – Complexo Carbonatítico de Bailundo (Angola): petrografia do grupo de amostras BL-P 01 a BL-P 81. *Relatório #6*, Protocolo Técnico-Científico Genius Mineira Lda. – Fundação da FCUL, 93 pp.

Beleque ARC, Santos PRA, Rodrigues PCR, Figueiras JMV, Mateus AMN (2009b) – Complexo Carbonatítico de Bailundo (Angola): química mineral do grupo de amostras BL-P 01 a BL-P 81. *Relatório #7*, Protocolo Técnico-Científico Genius Mineira Lda. – Fundação da FCUL, 46 pp.

Beleque ARC, Santos PRA, Rodrigues PCR, Figueiras JMV, Mateus AMN (2009c) – Fosfatos, flúor-carbonatos e óxidos de ETR e minerais do grupo do pirocloro em amostras do Complexo Carbonatítico de Bailundo (Angola). *Adenda ao Relatório #7*, Protocolo Técnico-Científico Genius Mineira Lda. – Fundação da FCUL, 24 pp.

Burt DM (1989) – Compositional and phase relations among rare earth element minerals. In: *Mineralogy of Rare Earth Element* (Paul H. Ribbe ed.) — Reviews in Mineralogy, **21**: 259-307, Mineralogical Society of America.

C

Coltorti M, Alberti A, Beccaluva L, dos Santos AB (1983) – The Tchivira Bonga alkaline-carbonatite complex (Angola): petrological study and comparison with some Brazilian analogues. *European Journal of Mineralogy*, **5**: 1001-1024.

Comin-Chiaramonti P, Gomes CB, Cundari A, Castorina F, Censi P (2007) – A review of carbonatitic magmatism in the Paraná-Angola-Etendeka system. *Geophysical Research Abstracts*, **9**: 11507.

Christie T, Brathwaite B, Tulloch A (1998) – *Mineral Commodities Report 17 – Rare earths and related elements*. New Zealand Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd.

Clark AM (1984) – Mineralogy of the rare earth elements. In: *Rare Earth Element Geochemistry* (P. Hendersen ed.). Elsevier, pp. 33-61.

G

Gomes CB, Comin-Chiaramonti P, Ruberti E e Azzone RG (2006) – A review of the carbonatitic magmatism in the Paraná-Angola-Namibia Province. *V South American Symposium on Isotope Geology*, pp. 416-419.

Gupta CK, Krishnamurthy N (2005) – Resource processing. In: *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press, pp. 132-200.

Graham AR (1955) – Cerianite CeO_2: a new rare-earth oxide mineral. *American Mineralogist*, **40**: 560-564.

Green TH (1995) – Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology* **120:** 347-359.

H

Haxel GB, Hedrick JB, Orris GJ (2002) – Rare Earth Elements — Critical resources for high technology. In: U.S. Geological Survey, fact sheet 087-02.

Hedrick JB (2007) – Rare Earths. In: U.S. Geological Survey. Compiler. *Mineral Yearbook 2007*, pp. 60.1-60.19. United States Department of the Interior.

Hedrick JB (2009) – Rare Earth. In: U.S. Geological Survey. Compiler. *Mineral Commodity Summaries 2009*, pp. 130-131. United States Department of the Interior.

Hedrick JB (2010) – Rare Earth. In: U.S. Geological Survey. Compiler. *Mineral Commodity Summaries 2010*, pp. 128-129. United States Department of the Interior.

Hogarth DD (1977) – Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineral*ogist, **62**: 403–410.

Hogarth DD (1989) – Pyrochlore, apatite and amphibole: distinctive minerals in carbonatite. In: *Carbonatites: genesis and evolution*. Unwin Hyman Ltd. London, pp. 105-148.

Hoernle K, Tilton G, Le Bas MJ, Duggen S, Garbe-Schönberg D (2002) – Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate. *Contribution to Mineral Petrology*, **142**: 520-542.

Huang Y.-M, Hawkesworth CJ, Calsteren P van, McDermott F (1995) – Geochemical characteristics and origin of the Jacupiranga carbonatites, Brazil. *Chemical Geology*, **119**: 79-99.

Hughes JM, Rakovan J (2002) –The crystal structure of apatite, $Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl)$. In: *Phosphates – Geochemical, Geobiological, and Materials Importance* (Kohn M J, Rakovan J & Hughes JM – eds.) – Reviews in Mineralogy & Geochemistry, **48**:1-12, Mineralogical Society of America.

I

Issa Filho A, dos Santos ABRMD, Riffel BF., Lapido Loureiro FEV, McReath I (1991) – Aspects of the geology, petrology and chemistry of some Angolan carbonatites. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**: 205-226.

K

Kanazawa Y, Kamitani M (2006) – Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of Alloys and Compounds*, **408-412**: 1339-1343.

L

Loureiro LFEV (1973) – Carbonatitos de Angola. *Inst. Inv, Científica Angola*, 242 pp.

Loureiro LFEV (1994) – Terras-raras no Brasil: depósitos, recursos identificados, reservas. *Série Estudos e Documentos*, Rio de Janeiro, **21**: 189.

Loureiro LFEV (1995) – *A mega-província carbonatítica Brasil-Angola e seus recursos minerais; geologia, petrografia, geoquímica, geologia económica*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 191 pp..

Le Bas MJ (1989) – Diversification of carbonatite. In: *Carbonatites, Genesis and Evolution* (Keith Bell ed.). London Unwin Hyman, pp. 428-445.

M

Matos Alves CA (1967) – Carbonatitos e rochas alcalinas. *Separata de Naturalia*, **vol. IX**, fasc. III-IV.

Mariano AN (1989) – Economic geology of rare earth minerals. In: *Mineralogy of Rare Earth Element* (Paul H. Ribbe ed.) — Reviews in Mineralogy, **21**: 309-333, Mineralogical Society of America.

Mariano AN (1989) – Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. In: *Carbonatites: genesis and evolution*. Unwin Hyman Ltd. London, pp. 149-176.

Mateus A (2008) – Menongue e Mungo (Angola); concessões para prospecção e pesquisa mineral atribuídas à Genius Mineira Lda. *Relatório de Missão*, Protocolo Técnico-Científico Genius Mineira Lda. – Fundação da FCUL, 19 pp.

Mateus A (2009) – Avaliação de valores de concentração em REE. *Relatório #1*, Protocolo Técnico-Científico Genius Mineira Lda. – Fundação da FCUL, 12 pp.

Mitchell RH (2005) – Carbonatites and Carbonatites and Carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, **43**: 2049-2068.

Mourão C, Mata J, Doucelance R, Madeira J, da Silveira AB, Silva LC, Moreira M (2010) – Quaternary extrusive calciocarbonatite volcanism on Brava Island (Cape Verde): A nephelinite-carbonatite immiscibility product. *Journal of African Earth Sciences*, **56**: 59-74.

N

Neary CR, Highley DE (1984) – The economic importance of the rare earth elements. In: *Rare Earth Element Geochemistry* (P. Hendersen ed.). Elsevier, pp. 423-466.

Ni Y, Hughes JM (1993) – The atomic arrangement of bastnäsite-(Ce), $Ce(CO_3)F$, and structural elements of synchysite-(Ce), röntgenite-(Ce), and parasite-(Ce). *American Mineralogist*, **78**: 415-418.

Ni Y, Post JE, Hughes JM (2000) – The crystal structure of parisite-(Ce), $Ce_2CaF_2(CO_3)_3$. *American Mineralogist*, **85**: 251-258.

P

Pan Y, Fleet ME (2002) – *Composition of the apatite-group minerals: Substitution Mechanisms and Controlling Factors* (Kohn M J, Rakovan J & Hughes J M – eds.) – Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, **48**:13-49.

Palme H, Jones A (2003) – *Solar system abundances of the elements*. In: Elsevier's Treatise on Geochemistry: Meteorites, Comets and Planets (Holand HD & Turekian KK, eds.), **vol. 1**: 41 – 61.

Palme H, O'Neill HSC (2003) – *Cosmochemical estimate of mantle composition*. In: Elsevier's Treatise on Geochemistry: The Mantle and Core (Holand HD & Turekian KK, eds.), **vol. 2**: 1 – 38.

Piccoli PM, Candela PA (2002) – *Apatite in igneous systems* (Kohn M J, Rakovan J & Hughes J M – eds.) – Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, **48**: 255-292.

R

Robles S, Watangua M, Isidoro L, Melgarejo J, Gali S, Olimpio A (2008) – Texture and chemistry of ilmenite, Catoca Kimberlite (Angola). *9th International Kimberlite Conference Extended Abstract*, Nº 9IKC-A-00280.

Rollison H (1993) – *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific & Technical, 352 pp..

Ruberti E, Castorina F, Censi P, Comin-Chiaramonti P, Gomes CB, Antonini P, Andrade FRD (2002) – The geochemistry of the Barra do Itapirapuã carbonatite (Ponta Grossa Arch, Brazil): a multiple stockwork. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**: 215-228.

S

Santos PRA, Beleque ARC, Mateus AMN (2009a) – Complexos Carbonatíticos de Angola: síntese do que se sabe como ponto de partida para investigar o desconhecido; implicações para a prospecção e pesquisa mineral. *Relatório #5*, Protocolo Técnico-Científico Genius Mineira Lda. – Fundação da FCUL, 12 pp.

Santos PRA, Beleque ARC, Mateus AMN (2009b) – Caracterização geoquímica das principais unidades litológicas constituintes do Complexo Carbonatítico de Bailundo (Angola). *Relatório #8*, Protocolo Técnico-Científico Genius Mineira Lda. – Fundação da FCUL, 60 pp.

Santos PRA (2010) – *Características mineralógicas, petrográficas e geoquímicas do Complexo Carbonatítico de Bailundo (Mungo, Angola) e sua relevância na avaliação de recursos potenciais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, 261 pp.

Seifert W, Kampf H, Wasternack, J (2000) – Compositional variation in apatite, phlogopite and other acessory minerals of the ultramafic Delitzsch complex Germany: implication for cooling history of carbonatites. *Lithos*, **53**: 81-100.

Sun S-s, McDonough WF (1989) – Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Magmatism in the Ocean Basins. Sauders AD & Norry MJ (Eds.). *Geological Society Special Publication* **42**: 313-345.

Sharygin VV, Sobolev NV, Channer D M.DeR. (2009) – Oscillatory-zoned crystals of pyrochlore-group minerals from the Guaniamo kimberlites,Venezuela. *Lithos*, **112S**: 976-985.

Skublov SG, Astaf B.Yu (2009) – First find cerianite in zircons from metasomatites of the Terskii Greenstone Belt, Baltic Shield. *Doklady Earth Sciences*, **428 (7)**: 1134-1138.

T

Traversa G, Gomes, CB, Brotzu P, Buraglini N, Morbidelli L, Principato MS, Ronca S, Ruberti E (2001) – Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **73 (1)**: 71-98.

U

US Geological Survey (2009) – Rare Earth Statistics, *in* DiFrancesco CA, e Hedrick JB, compilers – Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140, disponível online em http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/rareearths.pdf.

V

Van Wambeke L (1977) – The Karonge rare earth deposits, Republic of Burundi: New Mineralogical – Geochemical Data and Origin of the Mineralization. *Mineralium Deposita*, **12**: 373-380.

Vanderah AT, Levin I, Lufaso WM (2005) – An unexpected crystal-chemical principle for the pyrochlore structure. *European Journal of Inorganic Chemistry*, pp. 2895–2901.

W

Wang L, Ni Y, Hughes JM, Bayliss P & Drexler JW (1994) – The atomic arrangement of synchysite-(Ce), $CeCaF(CO_3)_2$. *The Canadian Mineralogist*, **32**: 865-871.

Weyer S, Münker C, Mezger K (2003) – Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle: implications for the differentiation history of the crust-mantle system. *Earth and Planetary Science Letters* **205:** 309-324.

Wilson M (1989) – Geochemical characteristics of igneous rocks as petrogenetic indicators. In: *Igneous Petrogenesis – A Global Tectonic Approach*. Unwin, Hyman, pp. 13-35.

Winter JD (2001) – Continental alkaline magmatism. In: *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall, pp. 362-400.

Woolley AR (1989) – The spatial and temporal distribution of carbonatites. In: *Carbonatites, Genesis and Evolution* (Keith Bell ed.). London Unwin Hyman, pp. 15-37.

Woolley AR, Kempe DRC (1989) – Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In: *Carbonatites, Genesis and Evolution* (Keith Bell ed.). London Unwin Hyman, pp. 1-14.

X

Xueming Y, Peishan Z, Kejie T, Xiaoyong Y, Shuangxi C, Minglong Z, Le Bas MJ, Wilson RN, Branson R, Campbell LS, Williams TC, Henderson P (1998) – Epitaxy of rare earth element fluorcarbonate minerals from carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, **vol. 43**, nº 13.

Y

Yang X-M, Yang X-Y, Zhang P-S, Le Bas MJ (2000) – Ba-REE fluorcarbonates minerals from a carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, North China. *Mineralogy and Petrology*, **70**: 221-234.

Yang X-M, Yang X-Y, Zheng Y-F, Le Bas MJ (2003) – A rare earth element-rich carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, North China. *Mineralogy and Petrology*, **78**: 93-110.

Yang X-Y, Sun, W-D, Zhang Y-X, Zheng Y-F (2009) – Geochemical constrains on the genesis of the Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit in Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**: 1417-1435.

ANEXO I

Tabela 1. Exemplos de aplicações dos ETR, Y, Sc e Th (adaptado de Christie *et al.*, 1998).

Elemento	Comentário	Aplicação
Lantânio	Componente *mischmetal*	Esmaltes cerâmicos, vidros ópticos de elevada qualidade, cristais microondas, polimento de vidro, petróleo *cracking*.
Cério	O ETR mais abundante. Componente principal do *mischmetal.*	Polimento de vidro, catalisador de petróleo *craking*, ligas com alumínio, magnésio e aço para aumentar o calor e propriedades de resistência, blindagem contra radiação.
Praseodímio		Pigmentos amarelos para cerâmica, azulejos. Ímans permanentes. Refrigeração criogénica.
Neodímio	Importante nas ligas magnéticas.	Esmaltes e vidros coloridos, lasers, ímans magnéticos de elevada resistência e eficiência como liga de neodímio-ferro-boro.
Promécio	Não encontrado na natureza. Produzido apenas em reactores nucleares.	Promécio radioactivo em baterias para relógios, instrumentos guia dos misséis.
Samário	Importante em ligas magnéticas.	Como liga de Samário-Cobalto em ligas altamente magnéticas para imã permanente; provável substituição por neodímio. Controle de reactor e blindagem de neutrões.
Európio	Um dos mais raros, e reactivos ETR. Absorve neutrões.	Controle de hastes em reactores nucleares. Lâmpadas fosforescentes. Fósforo vermelho em tubos de televisão.
Gadolínio		Constituintes de chips de memória dos computadores, refractário de alta temperatura, refrigerantes criogénicos.
Térbio	Associado ao Gadolínio.	Tubos de raios catódicos, memória computacional óptica; futuros componentes de discos rígidos.
Disprósio	Absorve neutrões. Liga magnética.	Controlo de reactores nucleares. Liga para imans permanentes juntamente com o neodímio.
Hólmio	Absorve neutrões.	Controlo de reactores nucleares; catalisadores; refractários.
Érbio	Propriedades físicas quase idênticas com o Hólmio e Disprósio.	Em cerâmica na produção de esmalte rosa; vidros de absorção infra-vermelha.
Túlio	Fornece raios-x na irradiação de reactores nucleares.	Fonte de Raios-X em equipamentos portáteis.
Itérbio	Propriedades muito similares ao Lutécio – mal conhecido.	Sob investigação.
Lutécio	Propriedades físicas e químicas mal conhecidas.	Desoxidador na produção de aço inoxidável, baterias recarregáveis, utilizações médicas, fósforo vermelho para televisões a cores, supercondutores.
Ítrio	Associado ao Hólmio, Érbio. Forjado a quente ou frio.	Desoxidador na produção de aço inoxidável, baterias recarregáveis, utilizações médicas, fósforo vermelho para televisões a cores, supercondutores
Escândio	Propriedades físicas e químicas próximas do Alumínio.	Tubos Raios-X, catalisadores para polimerização, superligas de Ni-Cr endurecidas, porcelana dentária.
Tório	Semelhante ao Níquel na suavidade e abundante como o Chumbo. Radioactivo.	Manto de gás. Pode ser usado como combustível nuclear em substituição do urânio.

ANEXO II

1. *FERRO-CARBONATITOS*

FICHA #1

Referência: BL-P-9

Coordenadas: 603395; 8656627

Local: Bailundo

Associação mineral principal: magnetite (Mgt), hematite (Hem), maghemite (Mgh), goethite (Gt), quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: barite (Brt)

Classificação: Bolsada magnetítica (minério de ferro) inclusa em carbonatito metassomatizado

Descrição:

Matriz essencialmente silicatada, constituída por agregados finos de quartzo; não se vislumbram carbonatos intersticiais, possivelmente devido aos processos metassomáticos tardios, responsáveis pela silicificação intensa (Fig 1).

A característica dominante é dada pela presença de agregados maciços de espinela oxidada (maghemite ± hematite) e parcialmente substituída por hidróxidos de ferro (goethite), principalmente nas orlas dos grãos. Os domínios nucleares dos grãos perservam, contudo, a espinela primária (magnetite; Fig. 2).

O desenvolvimento tardio, normalmente controlado por fracturas irregulares, de agregados ricos em goethite faz-se acompanhar por quartzo e barite.

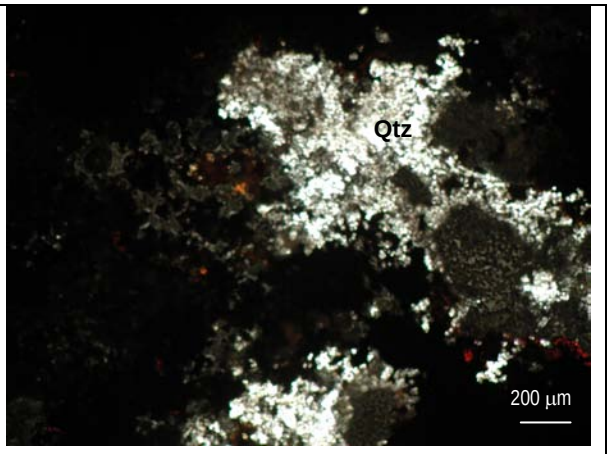


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 5x)

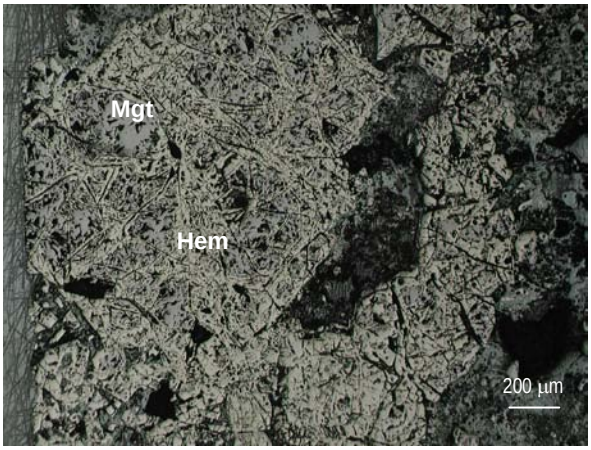


Figura 2. Luz reflectida (ampliação 5x)

Observações complementares: Tendo em conta a abundância de espinelas, é possível que a amostra coincida com uma anomalia geoquímica importante (Fe, Mn). Este exemplar foi seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #2

Referência: BL-P-10

Coordenadas: 603411; 8656535

Local: Bailundo

Associação mineral principal: (hidr)óxidos Fe (Goethite (Gt)), quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória:

Classificação: Minério de Fe em carbonatito metassomatizado

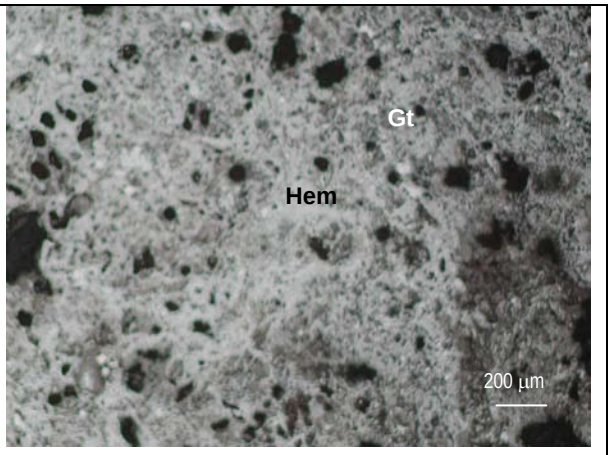


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 5x)

Descrição:

Matriz silicatada de granularidade fina, sem vestígios de carbonatos, que podem ter sido substituídos pelo quartzo no decurso de processos metassomáticos intensos (silicificação).

Rede anastomosada de fracturas irregulares preenchidas por agregados finos de (hematite-goethite) (Fig. 1). Estas fases minerais constituem ainda os principais produtos de oxidação/alteração das espinelas primárias, desenvolvendo orlas heterogéneas (por vezes zonadas). A goethite é muito abundante e, localmente, apresenta texturas simplectíticas resultantes da cristalização síncrona com as fases adjacentes, nomeadamente hematite (Fig. 1).

Observações complementares: Tendo em conta a abundância de espinelas, é possível que a amostra coincida com uma anomalia geoquímica importante (Fe, Mn). Seleccionada para estudos de microssonda.

FICHA #3

Referência: BL-P-11

Coordenadas: 603511; 8656549

Local: Bailundo

Associação mineral principal: (Hidr)óxidos Fe (goethite (Gt)), quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória:

Classificação: Minério de Ferro com matriz silicatada

Descrição:

Matriz silicatada de granularidade fina, consequência de processos de silicificação. Veios e venulações tardias compreendem agregados quartzosos de granularidade média (Fig.1).

Os minerais opacos formam agregados, relativamente grosseiros, de (hidr)óxidos de Fe, representando cerca de 80% da rocha. As espinelas revelam evidências de oxidação extrema, apresentando-se substituídas por hematite/maghemite. Como resultado de transformações tardias, desenvolvem-se agregados ricos em goethite, frequentemente preenchendo fracturas irregulares (Fig. 2).

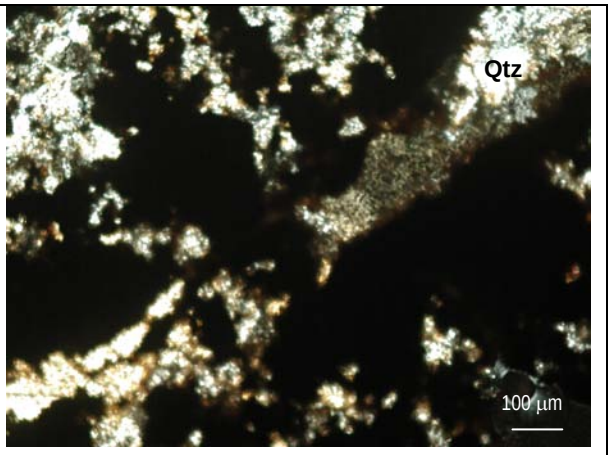


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

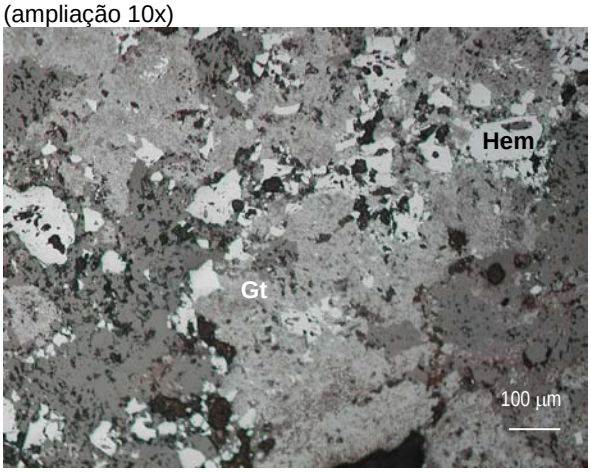


Figura 2. Luz reflectida (ampliação 10x)

Observações complementares: Amostra localizada no perfil de alteração definido pelas amostras BL-P 9 a BL-P 15. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #4

Referência: BL-P-12

Coordenadas: 603559; 8656587

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite/maghemite (Hem/Mgh), goethite (Gt)

Associação mineral acessória: quartzo (Qtz)

Classificação: Minério de ferro oxidado no seio de carbonatito metassomatizado

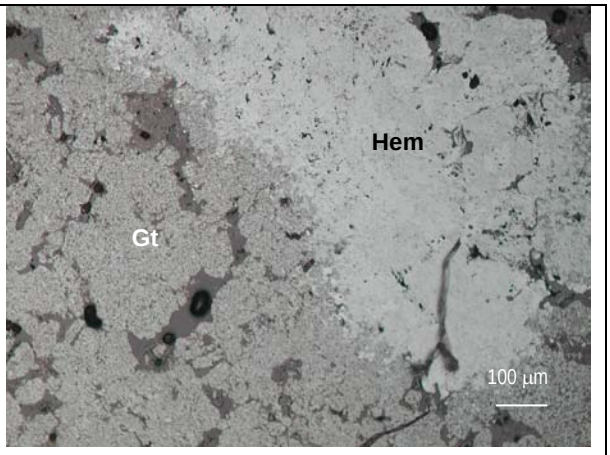


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados de silicatos (predominantemente quartzo) com granularidade fina a moderada.

Agregados de hematite/maghemite ocorrem com bastante frequência, resultado da oxidação das espinelas magnetíticas. Tardiamente, estes produtos de oxidação são heterogeneamente substituídos por goethite. Em domínios onde as transformações tardias se fazem sentir com forte intensidade, é comum haver preservação das "frentes de substituição" hematite/goethite (Fig.1).

Observações complementares: Rocha com alteração mais acentuada. Os hidróxidos de Fe surgem como os minerais mais abundantes.

FICHA #5

Referência: BL-P-13

Coordenadas: 603644; 8656650

Local: Bailundo

Associação mineral principal: goethite (Gt)

Associação mineral acessória: hematite (Hem), quartzo (Qtz)

Classificação: Minério de ferro oxidado no seio de carbonatito metassomatizado

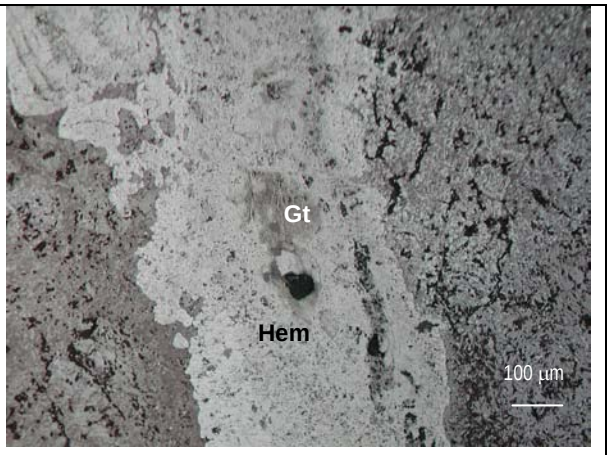


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados finos de quartzo, consequência de processos tardios de silicificação.

A goethite surge como fase dominante (90%), denunciando a forte intensidade da alteração a que o minério de ferro e o carbonatito envolvente foram sujeitos.

O desenvolvimento de hematite como resultado da oxidação das espinelas primárias encontra-se mal documentado, possivelmente devido à obliteração gerada pela goetização. Regista-se, contudo, a presença de hematite tardia (pós-espinela e ante-goethite), neo-formada, formando agregados que selam veios/venulações subsequentemente afectadas pelo processo de goetização (Fig.1).

Observações complementares: Amostra localizada no perfil de alteração definido pelas amostras BL-P 9 a BL-P 15.

FICHA #6

Referência: BL-P-14

Coordenadas: 603739; 8656716

Local: Bailundo

Associação mineral principal: magnetite (Mgt), hematite (Hem), maghemite (Mgh), goethite (Gt).

Associação mineral acessória:

Classificação: Bolsada magnetítica (minério Fe oxidado) no seio de carbonatito metassomatizado

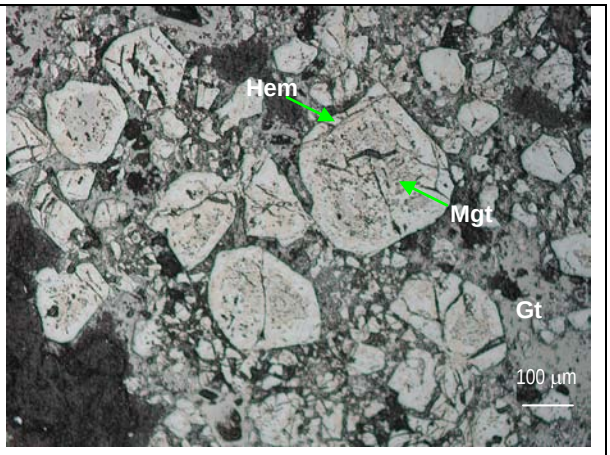


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Agregado maciço, de granularidade média a grosseira, constituído por espinelas magnetíticas e seus produtos de alteração (hematite/maghemite). Localmente, a textura assemelha-se à de uma brecha.

Espinelas com núcleos magnetíticos (óxidos de ferro primários) bem preservados surgem localmente, manifestando orlas de maghemite/hematite como resultado de oxidação intensa (Fig. 1). Domínios restritos de agregados ricos em goethite surgem na interface das espinelas e a matriz, registando o efeito de transformações tardias.

Observações complementares: Tendo em conta a abundância de espinelas, é possível que a amostra coincida com uma anomalia geoquímica importante (Fe, Mn). Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #7

Referência: BL-P-15

Coordenadas: 603871; 8656735

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Hematite/maghemite (Hem/Mgh), goethite (Gt)

Associação mineral acessória: quartzo (Qtz), magnetite (Mgt)

Classificação: Bolsada magnetítica (minério Fe oxidado) no seio de carbonatito metassomatizado

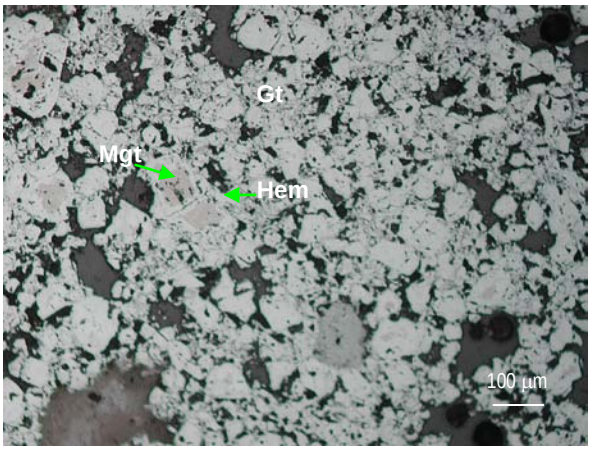


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Exemplar equivalente ao representado pela amostra BL-P-14, apesar dos núcleos magnetíticos serem raros; consequentemente, os produtos de oxidação extrema (hematite/maghemite) dominam a constituição mineralógica da bolsada (Fig. 1). As transformações tardias conduzem à formação incipiente de (hidr)óxidos de Fe (goethite), os quais tendem a ocupar os escassos espaços intersticiais, sobrepondo-se aos também parcos agregados finos de quartzo.

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #8

Referência: BL-P-20

Coordenadas: 603341; 8657064

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite (Hem), quartzo (Qtz), goethite (Gt)

Associação mineral acessória: (hidr)óxidos Fe, pirocloro (Pcl)

Classificação: Minério de Fe oxidado no seio de carbonatito metassomatizado

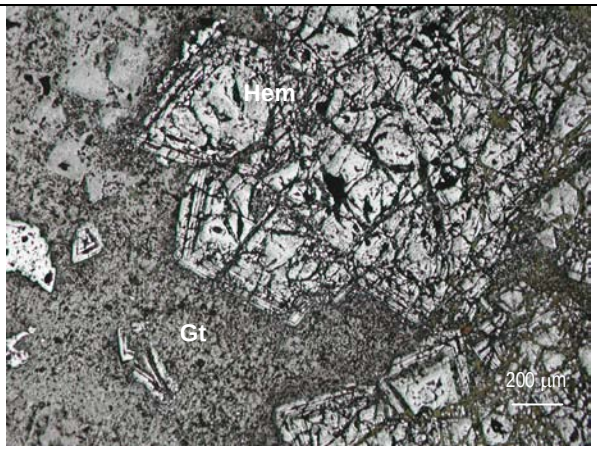


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 5x)

Descrição:

Matriz constítuida por agregados finos de quartzo. Este tectossilicato ocorre ainda sob a forma de agregados de maior granularidade, selando veios ou espaços intersticiais abertos tardiamente (como resultado da dissolução de carbonatos?). Poderá tal ser tomado como uma evidência de polifasismo dos processos de silicificação, ou apenas uma expressão da heterogeneidade associada ao seu desenvolvimento?

As espinelas apresentam indícios de forte corrosão e oxidação; consequentemente, a hematite e maghemite constituem as fases minerais predominantes (Fig. 1). Considerando a percentagem relativa de ocorrência das espinelas ferríferas, é possível que este exemplar se localize sobre (ou na proximidade) de uma anomalia geoquímica de Fe e Mn.

Transformações tardias dão origem a agregados de aspecto criptocristalinos de goethite, localmente acompanhados por pirocloro.

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #9

Referência: BL-P-21

Coordenadas: 603380; 8657081

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Hematite/maghemite (Hem/Mgh), goethite (Gt), quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: Fosfatos ETR, Flúor-carbonatos ETR

Classificação: Minério de Fe silicificado em carbonatito metassomatizado

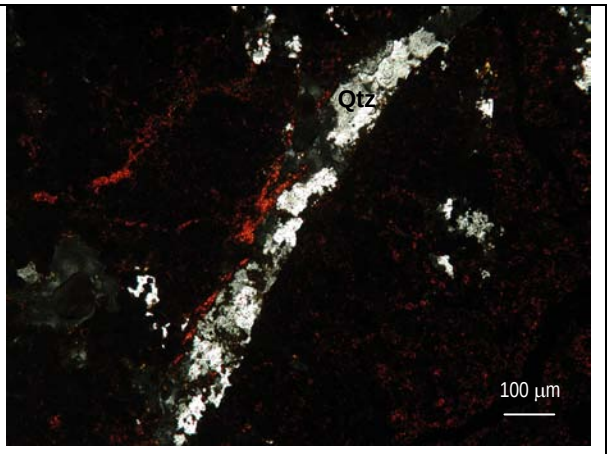


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Descrição: Matriz constituída por agregados finos de quartzo, resultantes de silicificação moderada.

Veios e filonetes tardios cortam a matriz formando uma rede anastomosada que se encontra preenchida por quartzo e em menores quantidades por fosfatos e flúor-carbonatos ETR, finamente intercrescidos e consequentemente de difícil identificação (Fig. 1).

Processos tardios estão também na origem de (hidr)óxidos Fe, preenchendo em fracturas inter-granulares (nomeadamente junto a grãos de espinela que, por sua vez, se encontram invariavelmente oxidadas e transformadas em hematite/maghemite).

Observações complementares: Seleccionada para estudos de microssonda.

FICHA #10

Referência: BL-P-22

Coordenadas: 603508; 8657077

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Goethite (Gt)

Associação mineral acessória: hematite (Hem), quartzo (Qtz)

Classificação: Minério Fe e Mn oxidado no seio de carbonatito metassomatizado

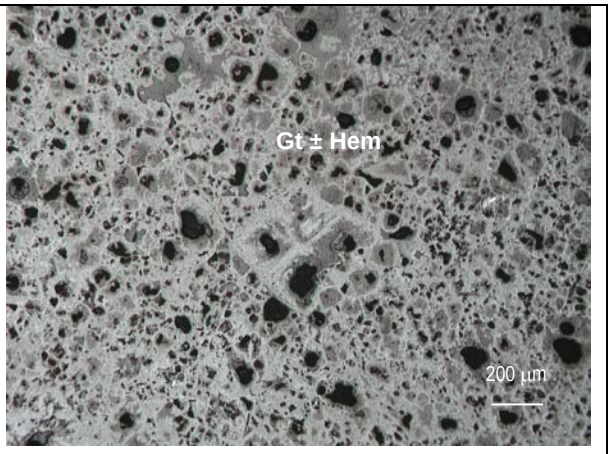


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 5x)

Descrição:

Matriz incipiente constituída por agregados de granularidade fina a média de quartzo, confinada a domínios que perfazem ≈1% do volume da rocha.

Espinelas plenamente oxidadas e substituídas por agregados tardios de hematite-goethite. A hematite cinge-se a alguns locais da amostra. As redes anastomosadas de fracturas preenchidas por agregados de goethite fina proliferam, documentando as transformações tardias (Fig. 1). Fases intermédias de hematite/goethite ocorrem disseminadas.

Observações complementares:

FICHA #11

Referência: BL-P-23

Coordenadas: 603631; 8657074

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Goethite (Gt), hematite (Hem), quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória:

Classificação: Minério Fe oxidado no seio de carbonatito metassomatizado

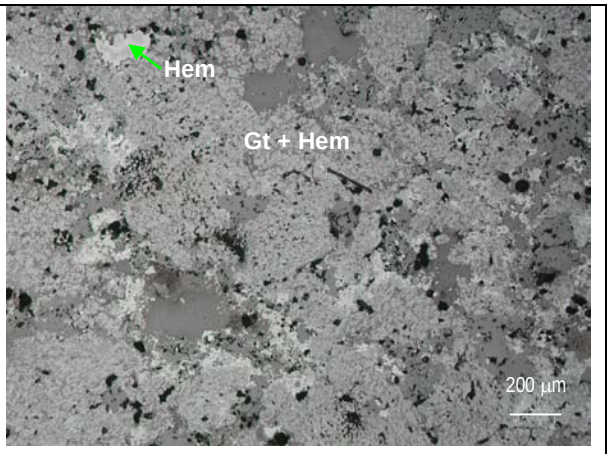


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 5x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo com granularidade variável (fina a grosseira), mostrando heterogeneidade dos processos de silicificação.

Os óxidos de ferro primários (magnetite) são abundantes e encontram-se invariavelmente oxidados, apresentando orlas espessas de maghemite/hematite; posteriormente, desenvolvem-se agregados de hematite + goethite (Fig. 1). Estas duas últimas fases apresentam granularidade fina (por vezes criptocristalina) e ocorrem em todo o volume da amostra.

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #12

Referência: BL-P-24

Coordenadas: 603751; 8657006

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite (Hem), goethite (Gt), quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória:

Classificação: Carbonatito silicificado, contendo mineralização de Fe disseminada

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo com granularidade fina a média, documentando intensa silicificação (Fig. 1).

Os espaços intersticiais na vizinhança dos grãos de espinelas, apresentam quartzo (tardio?) com granularidade consideravelmente mais grosseira que a matriz, o que possivelmente se deve à dissolução de carbonatos e concomitante desenvolvimento de vazios que favorecem o crescimento dos minerais (Fig. 1).

A alteração acentuada (e polifásica?) das espinelas, permite a formação de agregados xenomórficos de goethite ± hematite (Fig. 2).

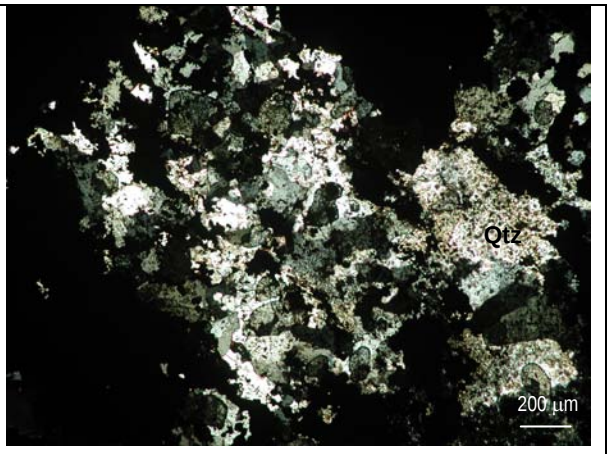


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 5x)

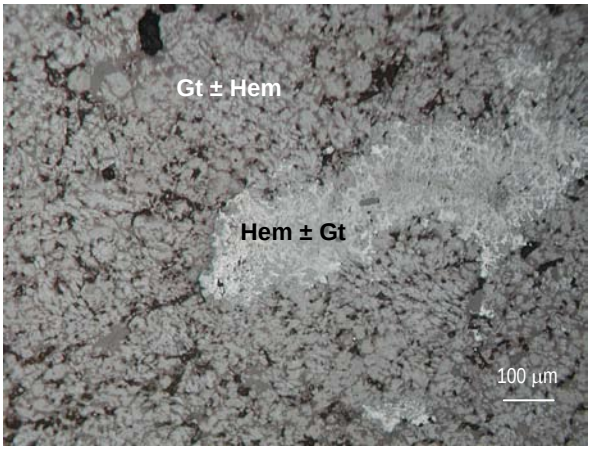


Figura 2. Luz reflectida (ampliação 10x)

Observações complementares:

FICHA #13

Referência: BL-P-25

Coordenadas: 603861; 8656887

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite (Hem), goethite (Gt), quartzo (Qtz), carbonatos

Associação mineral acessória: pirocloro (Pcl), pirite (Py)

Classificação: Carbonatito metassomatizado com mineralização disseminada

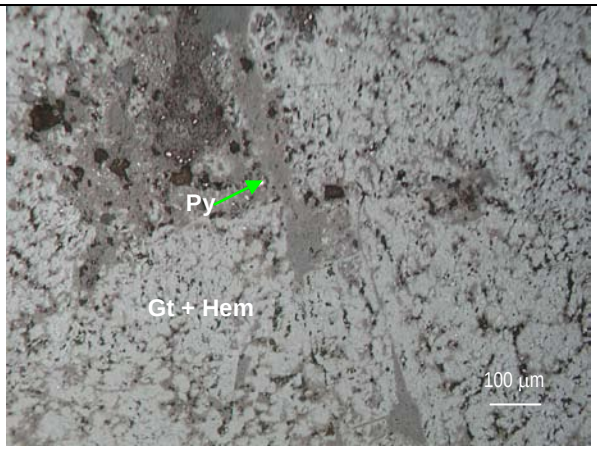


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados de granularidade muito fina de carbonato (dolomitíco/anqueritítco) e silicato (quartzo).

Rede densa de filonetes corta a rocha, apresentando preenchimentos diversos: intercrescimentos de fosfatos e flúor-carbonatos, ambos variavelmente enriquecidos em ETR, assim como hidr(óxidos) de Fe e pirocloro anédrico (Fig. 2). Toda esta associação mineralógica desenvolve-se nos estádios tardios do metassomatismo experimentado pela rocha carbonatítica.

Grãos micrométricos de sulfuretos (pirite) surgem ocasionalmente disseminados na matriz (Fig. 1)

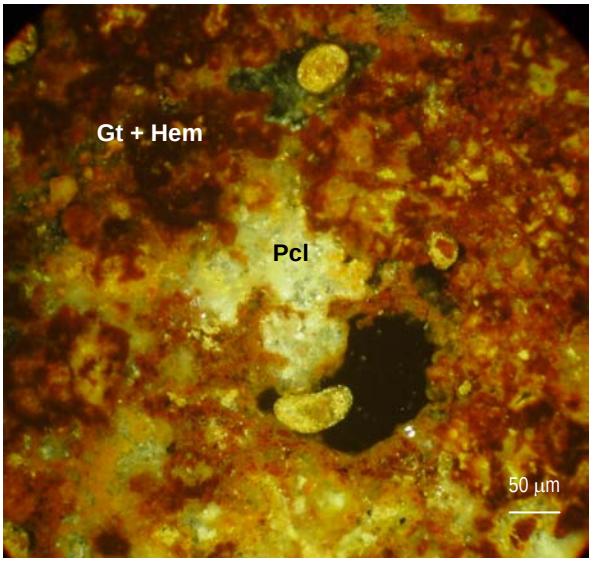


Figura 2. Luz reflectida com polaróides cruzados (ampliação 20x)

Observações complementares: Seleccionada para estudos de microssonda.

FICHA #14

Referência: BL-P-26

Coordenadas: 603952; 8656999

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite (Hem), goethite (Gt), (hidr)óxidos Mn (romanechite)

Associação mineral acessória: carbonatos (Carb), Óxidos ETR (cerianite (Cer), pirocloro (Pcl)

Classificação: Carbonatito metassomatizado contendo mineralização disseminada

Descrição:

Matriz constituída por agregados finos de quartzo; em espaços intersticiais, a granularidade aumenta.

Os carbonatos e o pirocloro surgem em pequenas quantidades, desenvolvendo disseminações no seio dos agregados que selam veios tardios (Fig. 1 e 2) ou formando grãos isolados sub-euédricos que se distribuem pela matriz siliciosa.

As espinelas são comuns e encontram-se invariavelmente oxidadas, dando origem a agregados de maghemite/hematite. A goethite e os (hidr)óxidos Mn, surgem no seguimento do desenvolvimento tardio dos processos metassomáticos e apresentam, localmente, texturas rendilhadas particulares, documentando diversos eventos de substituição (polifasismo).

Observa-se ainda, a presença de grãos micrométricos de óxidos ETR, cerianite – analisados na microssonda electrónica – disseminados na matriz silicatada, resultantes da alteração de um grão mineral pré-existente cujas características são impossiveis de determinar (Fig. 1 e 2).

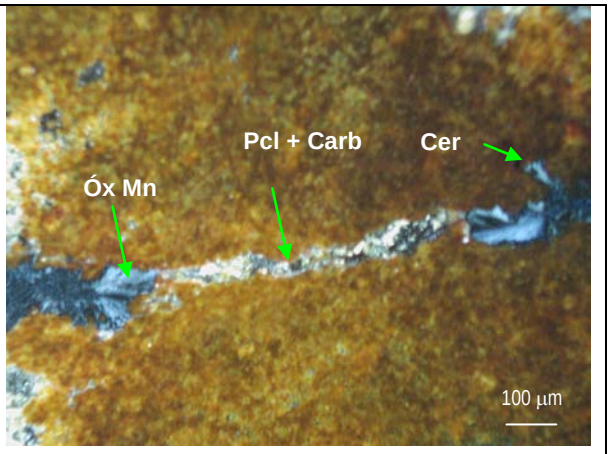


Figura 1. Luz com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Figura 2. Luz reflectida (ampliação 10x)

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #15

Referência: BL-P-34

Coordenadas: 603306; 8656382

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite (Hem), goethite (Gt), (hidr)óxidos Fe, quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (Titano)fosfatos de ETR (titano-rabdofanite?), carbonatos diversos (anquerite, calcite e dolomite), carbonatos ETR

Classificação: Minério Fe oxidado

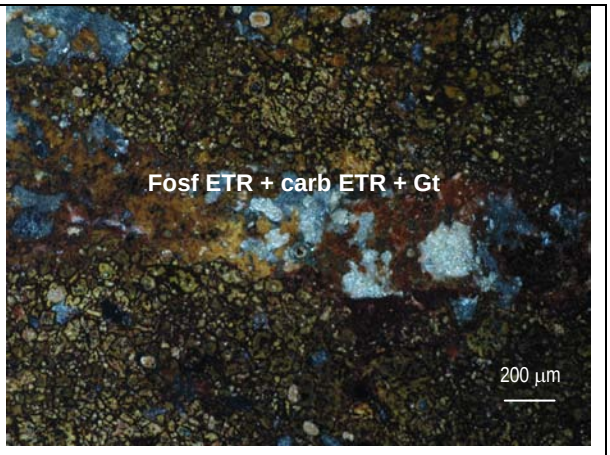


Figura 1. Luz reflectida com polaróides cruzados (ampliação 5x)

Descrição:

Matriz com pouca expressão no volume total da rocha, constituída por agregados relativamente finos de quartzo. No entanto, em veios tardios, a granularidade do quartzo aumenta consideravelmente, podendo mesmo ser grosseira, apresentando formas euédricas. Encontra-se, ainda, nos veios, misturas entre (titano)fosfatos de ETR, (hidr)óxidos Fe, carbonatos matriciais diversos e carbonatos ETR (Fig. 1).

Domínios ricos em espinelas (magnetite) euédricas de grandes dimensões são comuns; estas encontram-se invariavelmente oxidadas, apresentando orlas bem desenvolvidas de hematite/maghemite.

Observações complementares: Seleccionada para estudos de microssonda.

FICHA #16

Referência: BL-P-35

Coordenadas: 603477; 8656344

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite (Hem), goethite (Gt), quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: pirocloro (Pcl)

Classificação: Carbonatito metassomatizado contendo mineralização disseminada

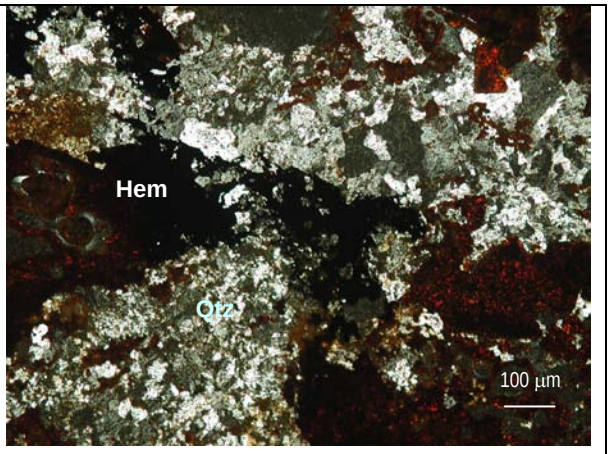


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo com granularidade fina (Fig. 1), cujos espaços intersticiais se encontram colmatados por (hidr)óxidos Fe. Localmente, os óxidos de ferro primários (magnetite) euédricos, encontram-se corroídos oxidados, sendo substituídos por quartzo de granularidade fina (matriz?), apresentando texturas esqueléticas (Fig. 1).

Abundantes filonetes, preenchidos por agregados de quartzo com granularidade fina a média intercrescido com pirocloro anédrico, surgem a cortar a rocha como consequência de processos tardios.

Regista-se ainda a presença de alguns grãos de pirocloro disseminados na matriz silicatada.

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #17

Referência: BL-P-36

Coordenadas: 603309; 8656304

Local: Bailundo

Associação mineral principal: carbonatos (dolomite (Dol)), hematite (Hem), goethite (Gt)

Associação mineral acessória: pirocloro (Pcl)

Classificação: Carbonatito metassomatizado contendo mineralização disseminada

Descrição:

Carbonatito dolomítico de granularidade fina, apresentando disseminações de (hidr)óxidos Fe com granularidade muito fina.

Múltiplos veios e filonetes recortam a matriz dando origem a texturas anastomosadas. As venulações são preenchidas por pirocloro anédrico e (hidr)óxidos Fe (Fig. 1). Todas estas fases desenvolvem intercrescimentos complexos de granularidade muito fina, dificultando a identificação precisa das mesmas.

Espinelas magnetíticas disseminadas na matriz carbonatada surgem corroídas, fracturadas e oxidadas devido aos processos tardios de oxidação/hidratação síncronos dos eventos metassomáticos (posteriormente retocados pela meteorização química). Muitas das fracturas encontram-se seladas por pirocloro anédrico (Fig. 2).

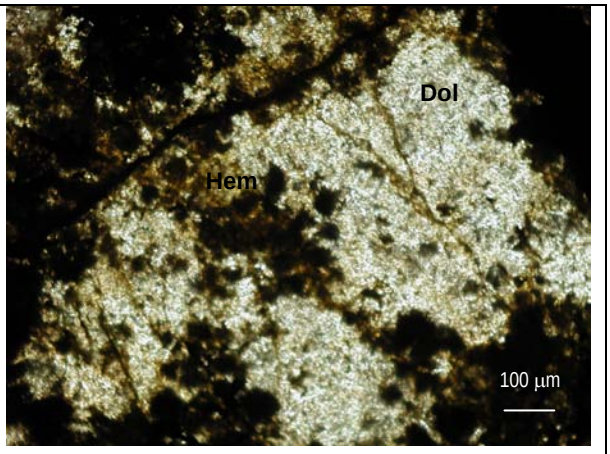


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

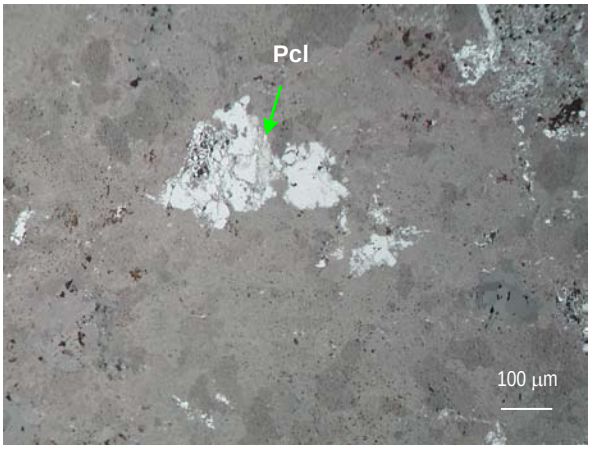


Figura 2. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #18

Referência: BL-P-37

Coordenadas: 603739; 8656239

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite (Hem), pirocloro (Pcl), (hidr)óxidos Fe

Associação mineral acessória: quartzo (Qtz), carbonatos e goethite (Gt)

Classificação: Minério de Fe com pirocloro no seio de carbonatito metassomatizado

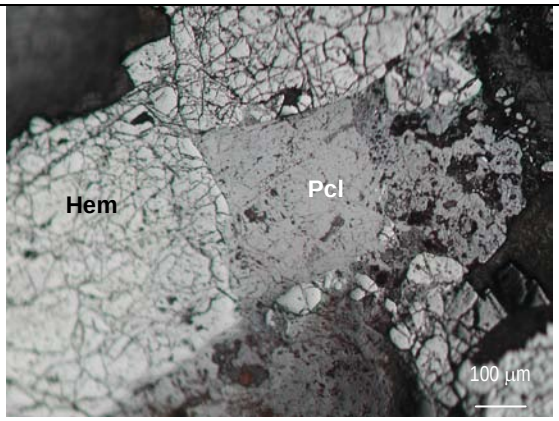


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Abundância de espinelas (magnetíticas) euédricas que apresentam indícios de forte corrosão, oxidação e alteração. Estas fases minerais encontram-se embebidas numa matriz muito reduzida e de granularidade muito fina de natureza carbonatada-siliciosa.

Os grãos de pirocloro euédrico fracturados (Fig. 3) são comuns e ocorrem de forma disseminada. As suas fracturas, tal como nas espinelas, são preenchidas por fases minerais tardias com granularidade fina, nomeadamente quartzo e (hidr)óxidos de Fe (Fig. 1 e 2).

Existem ainda filonetes que cortam a rocha e são preenchidos por agregados muito finos (micrométricos) de quartzo.

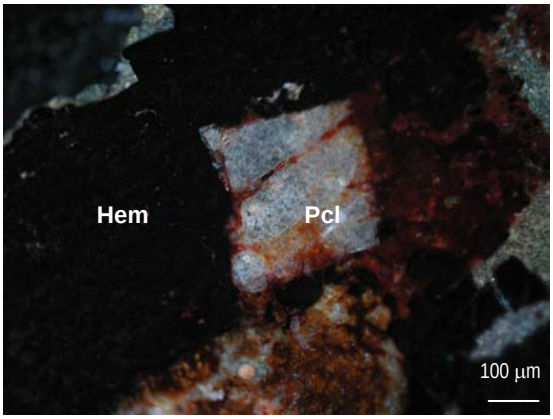


Figura 2. Luz reflectida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

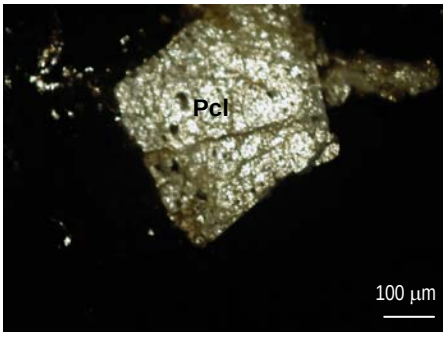


Figura 3. Luz transmitida com polaróides paralelos.

Observações complementares: A predominância de espinelas de Fe e Mn denuncia proximidade ou sobreposição a anomalias geoquímicas significantes de Fe e Mn. O abundante pirocloro poderá repercutir-se em anomalias de Nb. Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #19

Referência: BL-P-38

Coordenadas: 603741; 8656221

Local: Bailundo

Associação mineral principal: carbonato (calcite (Cal)), quartzo (Qtz) e (hidr)óxidos Fe

Associação mineral acessória: flúor-carbonatos, fosfatos ETR, pirocloro (Pcl) e mica potássica (teniolite (Tnl)).

Classificação: Carbonatito metassomatizado e mineralizado

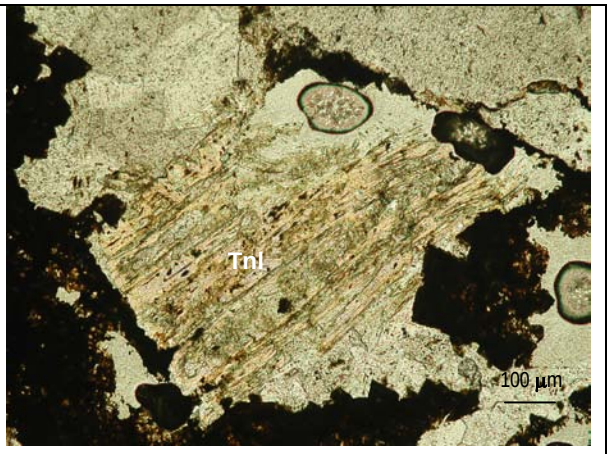


Figura 1. Luz transmitida (ampliação 10x)

Descrição:

Carbonatito (calcítico) de granularidade grosseira; os grãos de carbonato, consubstanciando a matriz, apresentam forma sub-euédrica a euédrica e são cortados por diferentes veios/filonetes.

Reconhecem-se dois tipos fundamentais de veios. Os de maior dimensão e apresentando desenvolvimento polifásico, são preenchidos por várias fases minerais como hidr(óxidos de Fe) de granularidade fina, quartzo grosseiro euédrico e carbonatos grosseiros euédricos. Os de menor dimensão e em maior número encontram-se, por sua vez, selados por agregados finos de flúor-carbonatos, fosfatos de ETR e pirocloro anédrico.

Grãos anédricos de goethite integram os agregados que selam polifasicamente os veios.

Salienta-se ainda a presença de alguns grãos de pirocloro euédrico disseminados na matriz, bem como de alguns grãos de mica (teniolite) que constituem agregados finos com aspecto bastante fibroso (Fig. 1).

Observações complementares: Seleccionada para estudos de microssonda.

FICHA #20

Referência: BL-P-40

Coordenadas: 604009; 8656197

Local: Bailundo

Associação mineral principal: carbonatos (dolomite (Dol)), óxidos de Fe

Associação mineral acessória: barite (Brt), fosfatos e/ou carbonatos ETR

Classificação: Carbonatito dolomítico com pirocloro

Descrição:

Carbonatito dolomítico de granularidade grosseira cortado por uma densa rede de veios e filonetes. Estes são preenchidos maioritariamente por (hidr)óxidos Fe, podendo ainda conter silicatos (quartzo) e barite.

Abundantes grãos euédricos de pirocloro (Fig. 1 e 2) encontram-se disseminados pela rocha. À semelhança dos carbonatos, apresentam fracturação que, por sua vez, está colmatada por fases minerais tardias (fosfatos e/ou carbonatos de ETR, barite e (hidr)óxidos Fe).

Os (hidr)óxidos Fe ocorrem em grande parte da amostra, apresentam aspecto vacuolar e, localmente, texturas esqueléticas, revelando fenómenos de alteração e substituição.

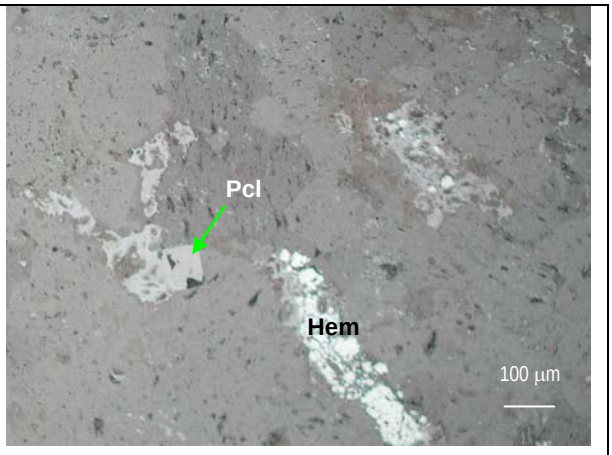


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

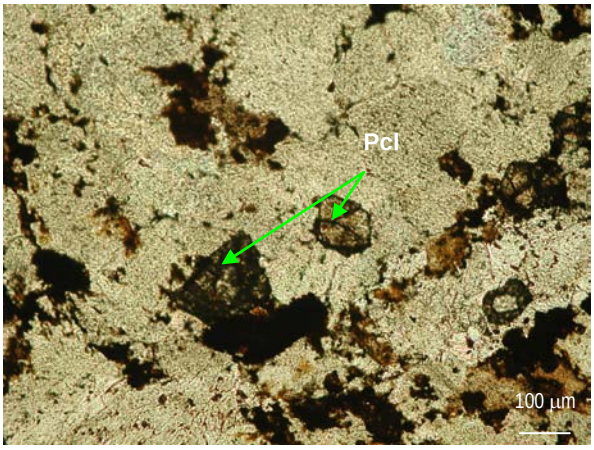


Figura 2. Luz transmitida, polaróides paralelos (ampliação 10x)

Observações complementares: Fases minerais ricas em elementos como o Nb, ETR, Ba. Exemplar seleccionado para análise de microssonda electrónica.

FICHA #21

Referência: BL-P-41

Coordenadas: 603979; 8656213

Local: Bailundo

Associação mineral principal: carbonatos (calcite (Cal)), (hidr)óxidos de Fe

Associação mineral acessória: quartzo (Qtz)

Classificação: Carbonatito calcítico com minério de Fe

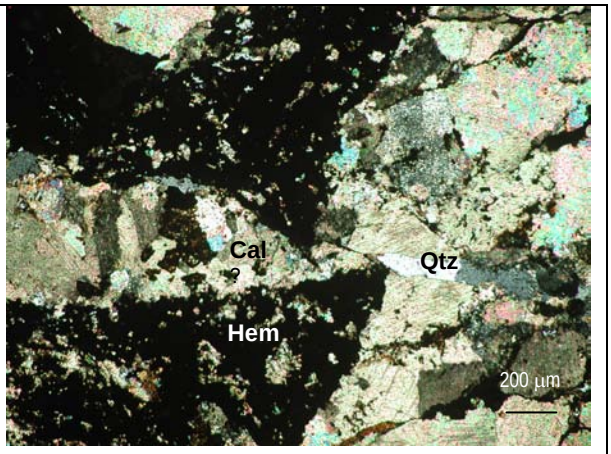


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 5x)

Descrição:

Carbonatito cuja matriz é constituída por agregados de calcite com granularidade fina a moderada. A mineralização compreende (hidr)óxidos de Fe e apresenta evidências de forte brechificação.

A matriz encontra-se recortada por uma rede de veios e filonetes preenchidos por intercrescimentos de carbonatos de granularidade fina, e silicatos (quartzo) de granularidade média (Fig. 1).

Observações complementares: A análise de microssonda será útil para verificar a presença de ETR nos silicatos e nos carbonatos tardios que surgem nos veios que cortam a mineralização brechificada.

FICHA #22

Referência: BL-P-42

Coordenadas: 603942; 8656202

Local: Bailundo

Associação mineral principal: (hidr)óxidos de Fe (goethite (Gt))

Associação mineral acessória: Silicatos

Classificação: Minério de Fe

Descrição:

Matriz constituída por agregados de granularidade média de silicatos (quartzo tardio?), consequência de silicificação intensa que substituiu, por completo, os carbonatos existentes.

Grande massa mineralizada brechificada (Fig. 1), constituída essencialmente por espinelas (magnetite), invariavelmente oxidadas; apresentam bordos espessos de maghemite/hematite. Agregados micrométricos de goethite selam fracturas nas espinelas.

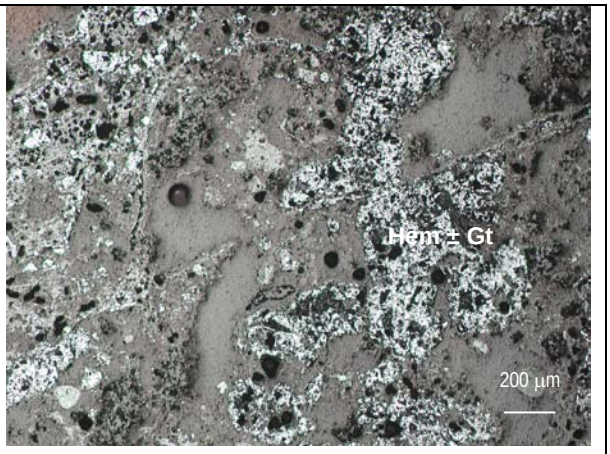


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 5x)

Observações complementares:

FICHA #23

Referência: BL-P-43

Coordenadas: 603943; 8656223

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonatos (Mg, Ca, Fe), óxidos (magnetite/hematite)

Associação mineral acessória: (titano) fosfatos ETR (titano-rabdofanite), (hidr)óxidos Fe e barite

Classificação: Carbonatito magnesiano

Descrição:

Carbonatito dolomítico de granularidade fina que em domínios sofre o efeito das transformações tardias (metassomáticas), dando origem a uma rede anastomosada de micro-venulações preenchidas por intercrescimentos de (titano)fosfatos ETR com (hidr)óxidos Fe, barite e carbonatos matriciais; todas estas fases minerais surgem com morfologia xenomórfica

Localmente, os óxidos de ferro primários (magnetite) são abundantes e encontram-se invariavelmente oxidados, evidenciando orlas espessas de maghemite/hematite.

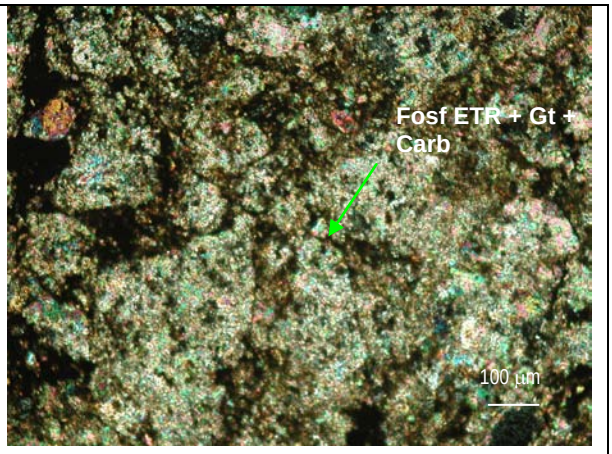


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x).

Observações complementares: Seleccionada para estudos de microssonda.

FICHA #24

Referência: BL-P-44

Coordenadas: 603938; 8656234

Local: Bailundo

Associação mineral principal: carbonatos (dolomite/anquerite), (hidr)óxidos de Fe, quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória:

Classificação: Carbonatito dolomítico, anquerítico

Descrição:

Carbonatito dolomítico/anquerítico de granularidade fina; matriz carbonatada evidencia substituição local por quartzo de grão fino como resultado de metassomatismo tardio.

Os efeitos tardios que se fazem sentir de forma intensa promovem o desenvolvimento de redes anastomosadas de veios preenchidos por (hidr)óxidos de Fe; observam-se disseminações micrométricas de (hidr)óxidos diversos.

Fenocristais euédricos incolores, com extinção ondulante e crescimentos secundários são interpretados como quartzo (Fig. 1). Estes grãos não se encontram fracturados, contrariamente aos carbonatos existentes na matriz, o que pode indicar uma origem distinta.

A presença de veios de quartzo com granularidade variando de fina nos bordos a moderada para o centro dos veios é frequente (Fig. 2); tal pode ser devido ao desenvolvimento polifásico do agregado durante o período de silicificação.

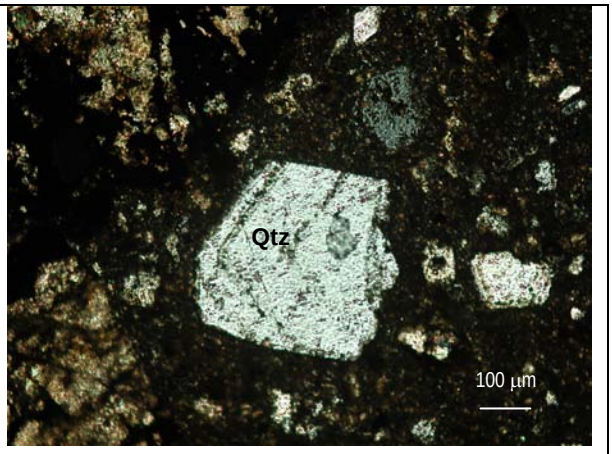


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

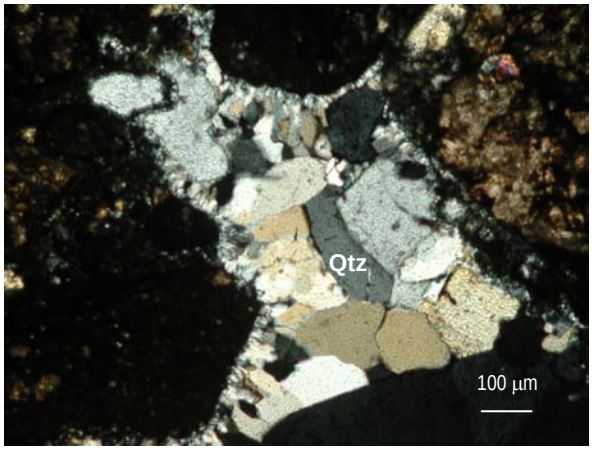


Figura 2. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #25

Referência: BL-P-45

Coordenadas: 603818; 8656357

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonatos Ca, Mg, (hidr)óxidos de Fe (goethite (Gt)), pirocloro (Pcl)

Associação mineral acessória: quartzo

Classificação: Carbonatito calcítico com minério de Fe

Descrição:

Carbonatito de granulariade fina, cuja matriz é constituída por agregados de dolomite, apresentando disseminação intensa de pirocloro euédrico (Fig. 1 e 2).

Os óxidos de ferro primários (magnetite) também se encontram em elevado número e disseminados pela matriz carbonatada; apresentam bordaduras evidentes devidas a oxidação/alteração constituídas por maghemite/hematite ou ainda goethite (Fig. 1).

No seio da matriz carbonatada ocorrem veios tardios preenchidos por quartzo e flúor-carbonatos de ETR, finamente intercrescidos, cuja análise química se revela fundamental para a sua caracterização fidedigna.

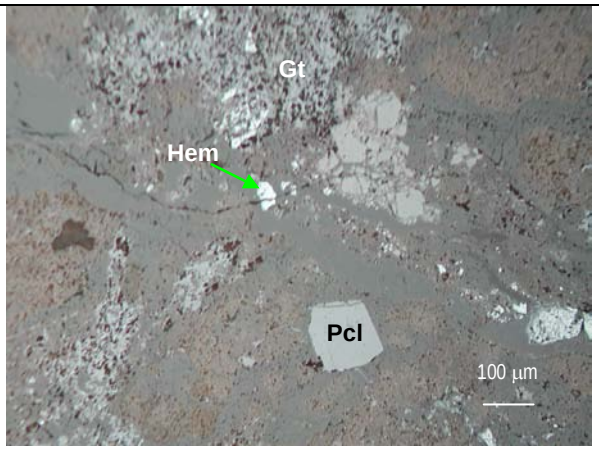


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

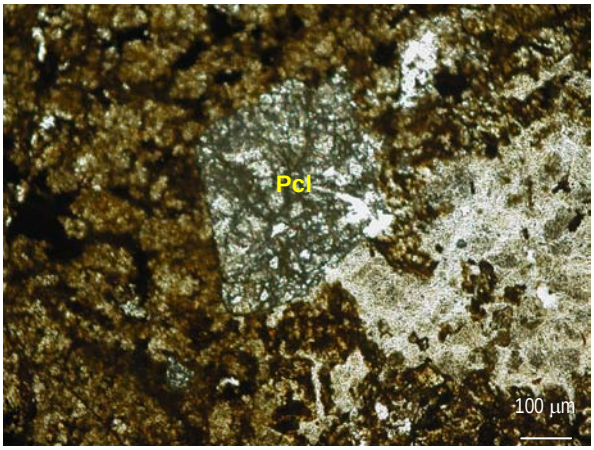


Figura 2. Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: Fases minerais ricas em elementos como o Nb, ETR e Fe. Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #26

Referência: BL-P-46

Coordenadas: 603770; 8656454

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Hematite (Hem), Goethite (Gt), silicatos

Associação mineral acessória: Carbonatos (anquerite)

Classificação: Carbonatito anquerítico contendo minério de Fe oxidado

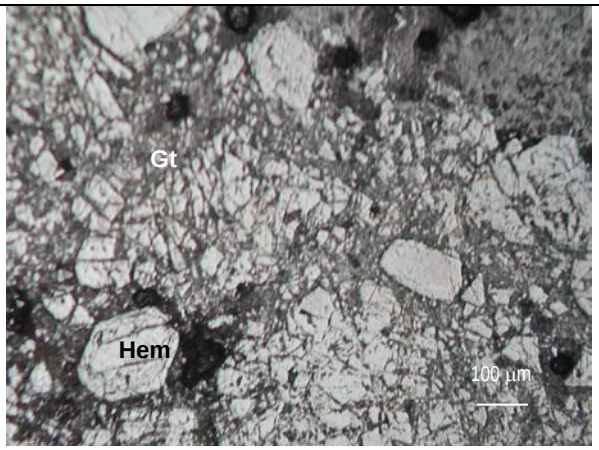


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz carbonatada integralmente substituída por silicatos de granulometria fina a média (consequência das transformações metassomáticas tardias), sendo que os carbonatos se encontram remetidos a escassos agregados de granulometria fina e de composição anquerítica.

As espinelas encontram-se oxidadas apresentando núcleos magnetíticos e orlas de maghemite/hematite (Fig 1). A presença de agregados de (hidr)óxidos de Fe (goethite) como resultado das transformações tardias, é uma constante em fracturas irregulares que se situam no seio das espinelas (Fig. 1).

Esta lâmina representa um domínio quasi-maciço de óxidos, pelo que se deverá posicionar sobre ou na proximidade de anomalias geoquímicas de Fe e Mn.

Observações complementares: Fases minerais ricas em Fe e Mn. Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #27

Referência: BL-P- 47

Coordenadas: 603600; 8656152

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hematite (Hem), silicato (quartzo)

Associação mineral acessória: goethite (Gt)

Classificação: Carbonatito silicificado com minério de Fe

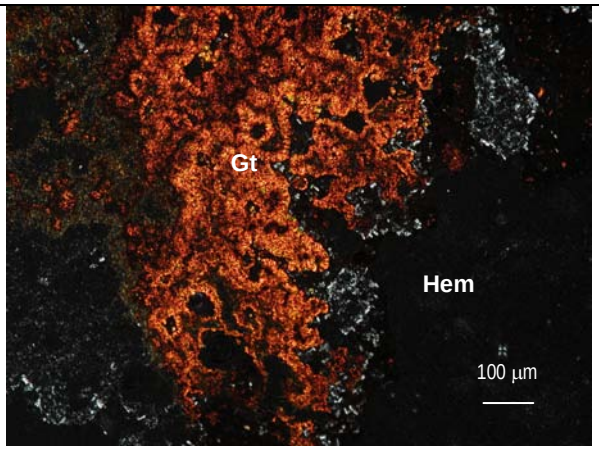


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz carbonatada substituída por silicatos de granulometria fina, consequência da forte silicificação experimentada pela rocha.

Como nota dominante as espinelas encontram-se fortemente oxidadas, prevalecendo, por isso, as fases minerais maghemite/hematite.

Localmente, a presença de texturas simplectíticas envolvendo (hidr)óxidos Fe, denunciam uma cristalização simultânea deste mineral com outra fase adjacente (hematite) (Fig. 1).

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #28

Referência: BL-P- 48

Coordenadas: 603637; 8656010

Local: Bailundo

Associação mineral principal: hidr(óxidos) de Fe (goethite (Gt)), carbonato (calcite (Cal)), pirocloro (Pcl)

Associação mineral acessória: quartzo, fosfatos e carbonatos ETR, pirite

Classificação: Carbonatito calcítico com minério de Fe

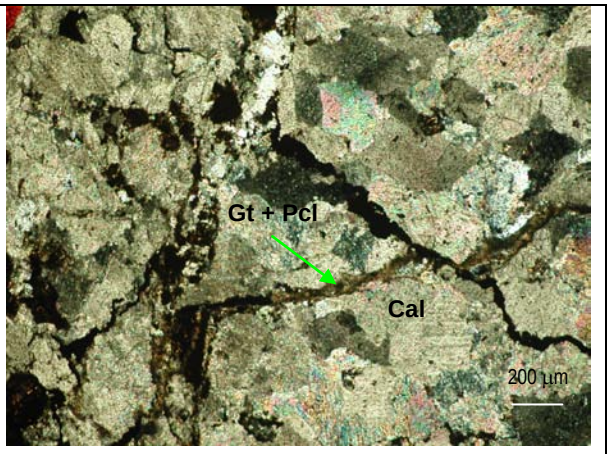


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 5x)

Descrição: Carbonatito calcítico de granularidade média a grosseira, apresentando aspecto limpído (Fig 1).

Os efeitos imputáveis a transformações tardias relacionam-se com o desenvolvimento de duas gerações de veios que cortam a matriz carbonatada, encontrando-se os de maior dimensão preenchidos por hidr(óxidos) de Fe e pirocloro (Fig. 1), enquanto que os segundos aparecem selados por quartzo tardio e/ou fosfatos de ETR e/ou flúor-carbonatos de ETR; tintas de birrefrangência alta aliada à granularidade fina dos agregados dificultam a sua identificação óptica precisa, requerendo trabalho analítico de microssonda.

Presença, ainda, na matriz carbonatada, de alguns grãos de pirocloro euédrico e raros sulfuretos micrométricos disseminados (pirite).

Observações complementares: O trabalho de microssonda é imprescindível na caracterização correcta das fases potencialmente ricas em ETR, bem como na quantificação do Nb nas fases piroclóricas. Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

2. *CÁLCIO-CARBONATITOS*

FICHA #29

Referência: BL-P- 1

Coordenadas: 602978; 8656877

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo, pirocloro, hematite (Hem)

Associação mineral acessória: piroxena

Classificação: Carbonatito metassomatizado com pirocloro

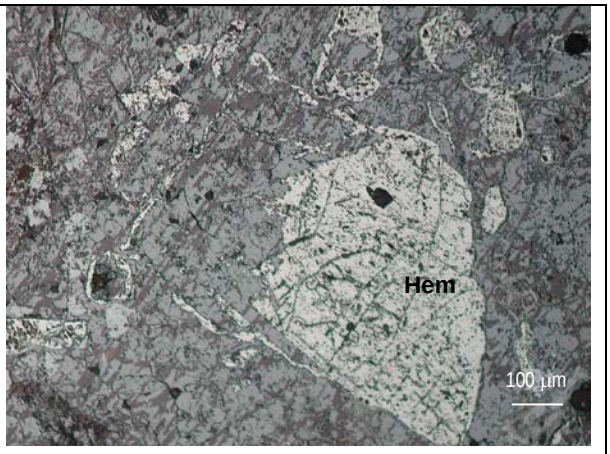


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo de granularidade média a grosseira, reflectindo forte silicificação da massa carbonatada. Grãos de pirocloro euédrico surgem disseminados pela matriz representando uma das fases primárias.

Localmente, as espinelas primárias (magnetite) surgem oxidadas e corroídas, apresentando texturas esqueléticas no seio da matriz siliciosa (Fig. 1).

Minerais sub-euédricos amarelos acastanhados, fibrosos e de relevo alto, identificam-se como possíveis piroxenas e encontram-se disseminados na matriz siliciosa.

Observações complementares: A confirmar na análise de microssonda electrónica as possíveis piroxenas identificadas opticamente. Seleccionada para estudos de microssonda.

FICHA #30

Referência: BL-P-2

Coordenadas: 602986; 8656904

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo, piroxena (Px)

Associação mineral acessória: (hidr)óxidos Fe

Classificação: Carbonatito metassomatizado

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo de granularidade fina a média, onde se encontram grãos de pirocloro euédrico homogeneamente disseminados.

Mineral de cor castanha, abundante em toda a amostra, apresentando frequentemente texturas dendríticas (Fig. 1) reveladoras de processos de substituição tardios deste mineral por, possivelmente, quartzo matricial; algumas das texturas observadas reflectem processos de arrefecimento brusco e cristalização rápida deste mineral, que foi classificado como piroxena metassomática.

Localmente, encontram-se disseminados na matriz, minerais de granularidade fina com hábito acicular, possivelmente piroxena com origem em processos tardios metassomáticos (Fig. 2).

Venulações tardias cortam a matriz siliciosa e são preenchidas por quartzo grosseiro intercrescido com pirocloro xenomórfico, corroborando mais uma vez a ideia deste mineral surgir com formas anédricas em veios com origem em processos hidrotermais tardios.

Espinelas primárias (magnetite) formam disseminações e encontram-se invariavelmente oxidadas, apresentando orlas espessas de maghemite/hematite.

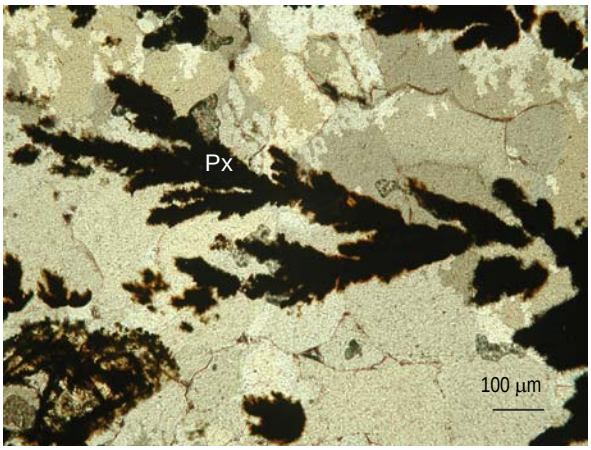


Figura 1. Luz transmitida (ampliação 10x)

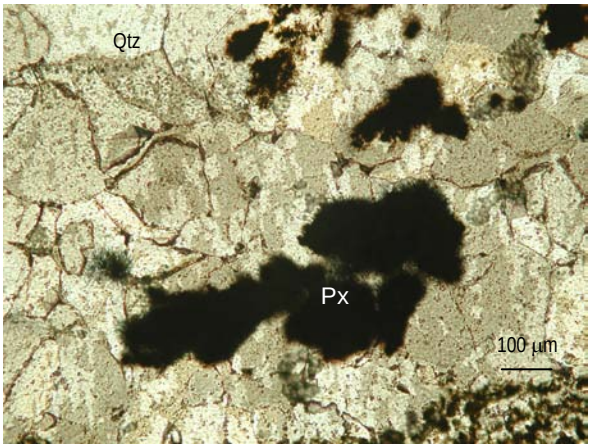


Figura 2. Luz transmitida (ampliação 10x)

Observações complementares: O mineral identificado como piroxena carece de confirmação na análise de microssonda electrónica. Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #31

Referência: BL-P-3

Coordenadas: 603007; 8656895

Local: Bailundo

Associação mineral principal: quartzo, hematite (Hem), goethite (Gt)

Associação mineral acessória: pirocloro

Classificação: Carbonatito silicificado

Descrição:

Matriz constituida por agregados de quartzo com granulometria fina, não se registando existência de carbonatos. O pirocloro xenomórfico surge disseminado pela matriz, contrariando a regra de aparecer com formas anédricas, em veios tardios. Alguns veios surgem preenchidos por quartzo grosseiro.

Frequentemente, os óxidos de ferro primários manifestam forte corrosão, encontrando-se invariavelmente oxidados, dando origem a domínios de alteração onde a hematite ± goethite formam agregados finamente intercrescidos (Fig. 1). Texturas simplectíticas entre goethite e hematite, revelam crescimento síncrono destas duas fases minerais.

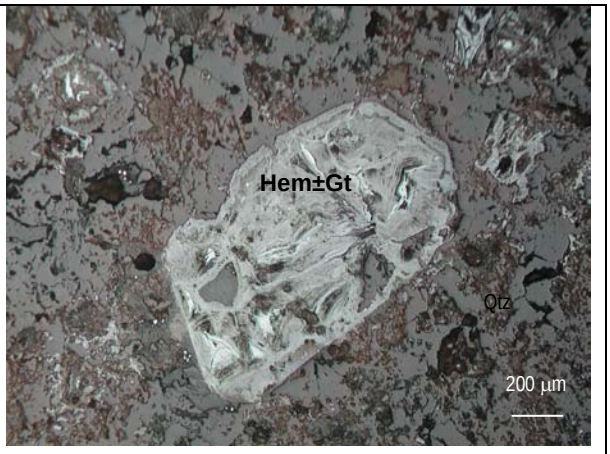


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 5x)

Observações complementares:

FICHA #32

Referência: BL-P-4

Coordenadas: 602996; 8656951

Local: Bailundo

Associação mineral principal: (hidr)óxidos Fe (goethite (Gt)), piroxena (Px), quartzo, pirocloro

Associação mineral acessória:

Classificação: Carbonatito silicificado com piroxena?

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo com granularidade média a grosseira onde os grãos surgem zonados e imbricados, denotando, possivelmente, acomodação de deformação (Fig. 1). O carbonato é manifestamente exíguo.

Rede de veios preenchidos por (hidr)óxidos Fe e mineral de cor castanha, xenomórfico (piroxena) que se apresenta como mineral de alteração no seguimento de efeitos tardios (Fig. 1). Os agregados de (hidr)óxidos Fe com desenvolvimento matricial substituem espinelas existentes.

A piroxena, possivelmente de substituição, identifica-se também em agregados finos disseminados pela matriz, podendo mesmo apresentar, localmente, hábito acicular.

Grãos de pirocloro euédrico disseminados pela matriz surgem como fase primária.

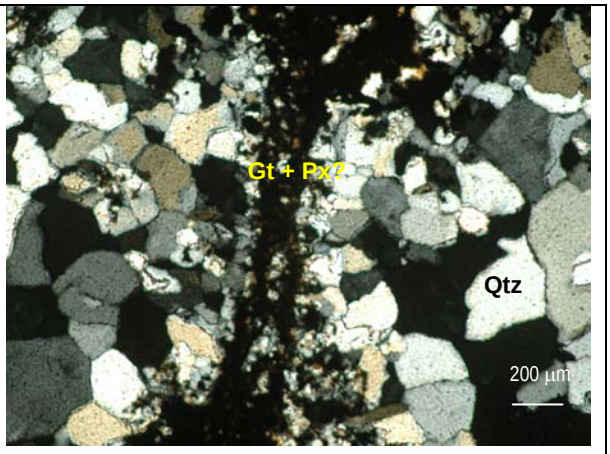


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 5x)

Observações complementares: Confirmação na análise de microssonda electrónica da proposta de piroxena.

FICHA #33

Referência: BL-P-5

Coordenadas: 603008; 8656917

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Piroxena (Px), quartzo (Qtz), pirocloro, (hidr)óxidos Fe (goethite (Gt))

Associação mineral acessória: hematite

Classificação: Carbonatito silicificado com piroxena

Descrição:

Matriz constituida por agregados de quartzo de granularidade média, onde surgem disseminados grãos de pirocloro euédrico, identificados como fases primárias.

Abundante mineral transparente, de cor castanha, textura botrioidal (indicando substituição de outras fases pré-existentes, possivelmente, quartzo matricial e carbonato pré-existente), que foi identificado como piroxena. Este mineral surge, também, intercrescido com (hidr)óxidos Fe em veios, resultantes das transformações tardias (metassomatismo).

Localmente, espinelas magnetíticas ocorrem; estas evidenciam oxidação intensa, apresentando orlas espessas de maghemite/hematite.

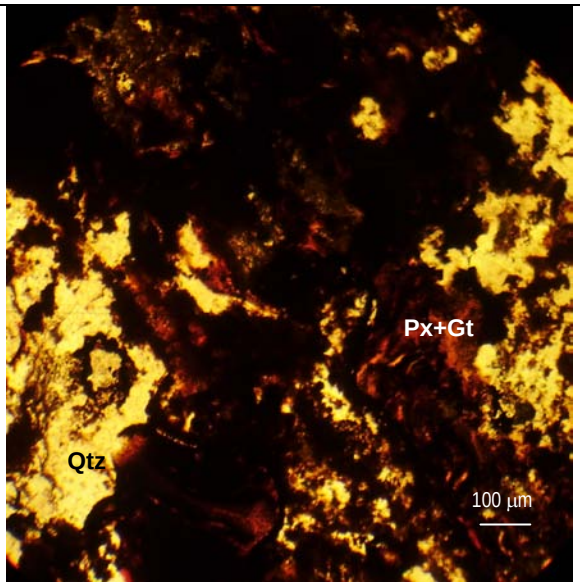


Figura 1. Luz transmitida (ampliação 10x)

Observações complementares: A fase mineral identificada como piroxena carece de confirmação na análise de microssonda electrónica. Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #34

Referência: BL-P-6

Coordenadas: 603010; 8656900

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Piroxena (Px), pirocloro (Pcl), quartzo

Associação mineral acessória: hematite, goethite

Classificação: Carbonatito silicificado com piroxena e pirocloro

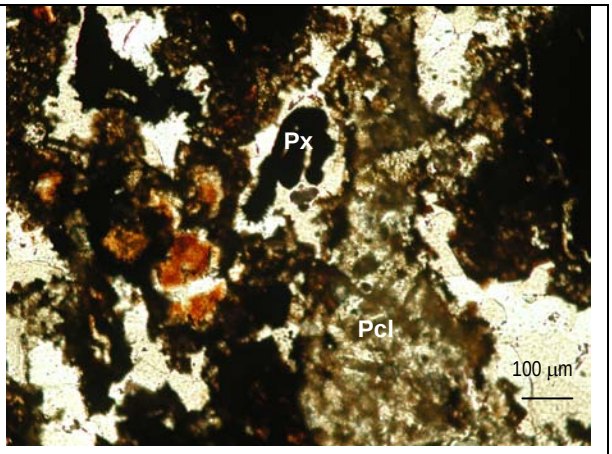


Figura 1. Luz transmitida (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo com granularidade fina; localmente, estes agregados revelam granularidade grosseira, possivelmente denunciando estádios tardios de crescimento após dissolução dos carbonatos. Abundante pirocloro euédrico em toda a matriz como fase primária (Fig. 2)

Grandes massas de piroxena (mineral de cor castanha, transparente por vezes surge com hábito acicular (Fig. 1), que pode ter origem em transformações tardias.

Em menor quantidade surgem espinelas Fe, oxidadas e fortemente alteradas, dando origem a (hidr)óxidos Fe (goethite ± hematite).

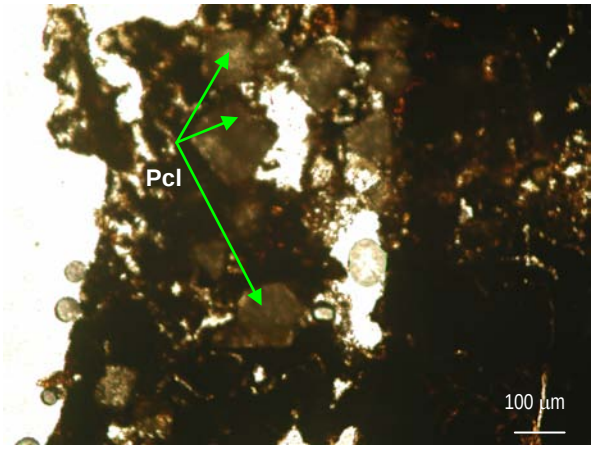


Figura 2. Luz transmitida, polaróides paralelos.

Observações complementares: Confirmação da Identificação óptica da piroxena na microssonda electrónica. Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #35

Referência: BL-P-7

Coordenadas: 602919; 8656793

Local: Bailundo

Associação mineral principal: calcite (Cal), pirocloro, (hidr)óxidos Fe e Mn

Associação mineral acessória: flúor-carbonatos, barite, fosfatos ETR, silicatos

Classificação: Carbonatito calcítico

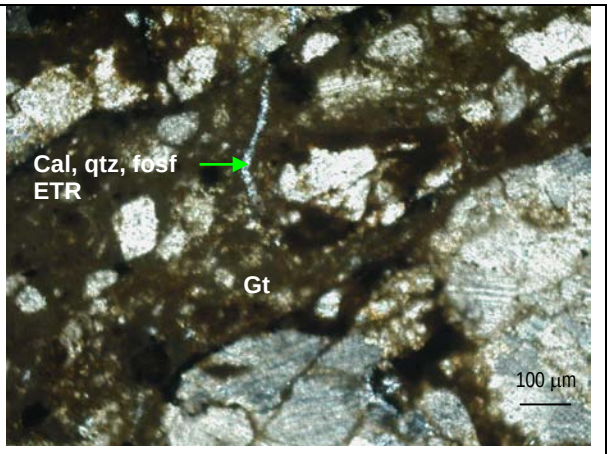


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Descrição:

Carbonatito calcítico com granularidade grosseira, apresentando pirocloro euédrico disseminado pela matriz.

Desenvolvimento tardio (normalmente controlado por filonetes e venulações que cortam a matriz carbonatada) de agregados ricos em silicatos, fosfatos e flúor-carbonatos enriquecidos em ETR; a granularidade muito fina destes agregados dificulta a identificação óptica precisa das diferentes fases presentes (Fig. 1). Uma outra família de filonetes, desta vez preenchidos por quartzo e barite de granularidade fina, cortam igualmente a matriz carbonatada. Verifica-se, ainda, a existência de carbonatos e (hidr)óxidos Fe com granularidades muito finas ao longo das paredes dos filonetes (Fig. 1).

(Hidr)óxidos Fe localizam-se no espaço intergranular dos carbonatos matriciais (Fig. 1) e disseminados pela totalidade da amostra, indiciando processos de substituição.

Ocorrência de óxidos primários manifestando orlas tardias de oxidação compostas por hematite/maghemite e, por vezes, desenvolvendo texturas quasi-brechóides.

Observações complementares: Análise de microssonda vislumbra-se de extrema importância para identificação das fases minerais tardias enriquecidas em ETR, que surgem com granularidades finas. Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #36

Referência: BL-P-8

Coordenadas: 602914; 8656916

Local: Bailundo

Associação mineral principal: anquerite (Anq), quartzo, espinelas Fe

Associação mineral acessória: apatite (Ap)

Classificação: Carbonatito anquerítico metassomatizado

Descrição:

Matriz carbonatada anquerítica com granularidade grosseira cortada por rede de veios preenchidos por quartzo tardio com granularidade média (Fig. 1).

Os (hidr)óxidos Fe ocorrem preferencialmente nos domínios intergranulares carbonatados, substituindo-os na sequência de processos tardios de metassomatismo. Apatite xenomórfica surge como fase secundária no preenchimento de fracturas que cortam a matriz anquerítica.

Grãos euédricos de espinela ferrífera desenvolvem disseminações e revelam orlas de oxidação, apresentando hematite + goethite.

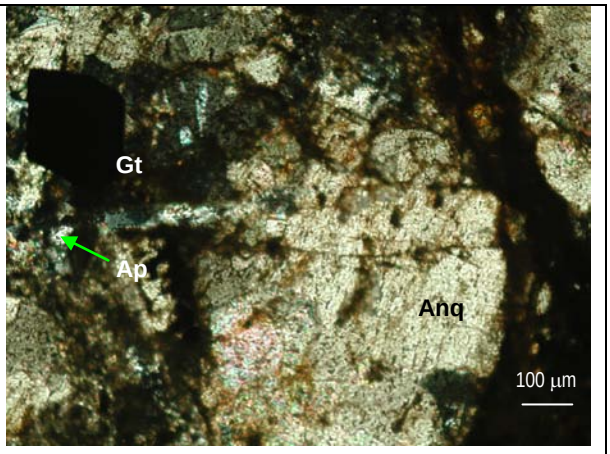


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Observações complementares: Análise de microssonda electrónica para esclarecer todas as fases identificadas e interrogadas.

FICHA #37

Referência: BL-P-16

Coordenadas: 603225; 8656975

Local: Bailundo

Associação mineral principal: calcite (Cal), (hidr)óxidos Fe (goethite (Gt))

Associação mineral acessória: quartzo (Qtz), carbonatos e fosfatosETR

Classificação: Carbonatito calcítico

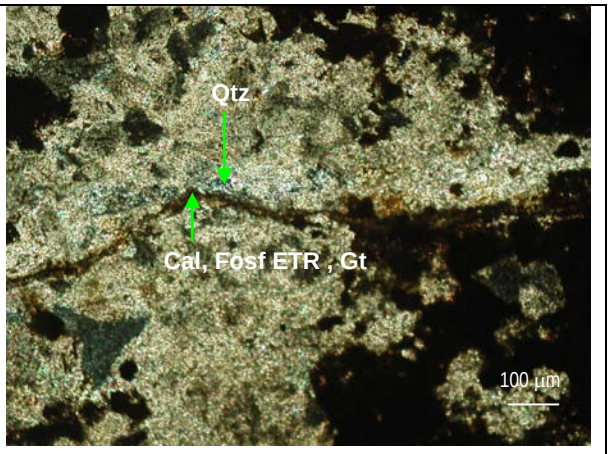


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Descrição:

Carbonatito calcítico de granularidade fina, embora localmente a dimensão dos grãos constituintes seja grosseira. Nos interstícios dos carbonatos surgem raros agregados de quartzo finamente intercrescidos que parecem substituir o carbonato (silicificação incipiente) (Fig. 1).

Em domínios onde os efeitos de transformações tardias (metassomáticas) se fazem sentir com maior intensidade, surgem redes anastomosadas de veios preenchidos por flúor-carbonatos de ETR, fosfatos de ETR e quartzo. Raros (hidr)óxidos de Fe com granularidade fina integram também a associação mineral tardia (Fig. 1).

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #38

Referência: BL-P-17

Coordenadas: 603213; 8656983

Local: Bailundo

Associação mineral principal: calcite, pirocloro, quartzo

Associação mineral acessória: (hidr)óxidos Fe, apatite (Ap), barite (Brt)

Classificação: Carbonatito calcítico

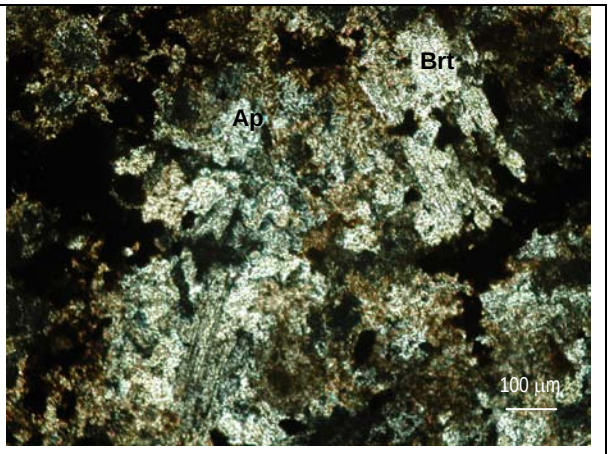


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Descrição: Carbonatito calcítico com granularidade fina a média cortado por redes anastomosadas de veios preenchidos por (hidr)óxidos Fe. Grãos de pirocloro euédrico disseminados na matriz carbonatada correspondem a uma fase primária.

Outra família de veios (processos tardios) corta a matriz carbonatada e é preenchida por agregados muito finos de flúor-carbonatos ou fosfatos de ETR.

Grãos de barite parecem ser substituídos por carbonatos e quartzo como resultado de processos tardios de metassomatismo (carbonatação e silicificação) (Fig. 1).

Grãos euédricos de apatite com granularidade grosseira desenvolvem-se tardiamente no domínio matricial como resultado possível de processos tardios (Fig. 1).

Encontram-se ainda, localmente, espinelas magnetíticas oxidadas, parcialmente substituídas por hematite e maghemite.

Observações complementares: A análise de microssonda será importante para identificar correctamente as fases interrogadas: (apatite, barite, carbonatos e fosfatos tardios).

FICHA #39

Referência: BL-P-18

Coordenadas: 603209; 8657063

Local: Bailundo

Associação mineral principal: magnetite (Mgt), hematite (Hem), calcite

Associação mineral acessória: carbonato e fosfatos ETR

Classificação: Carbonatito calcítico com espinelas Fe

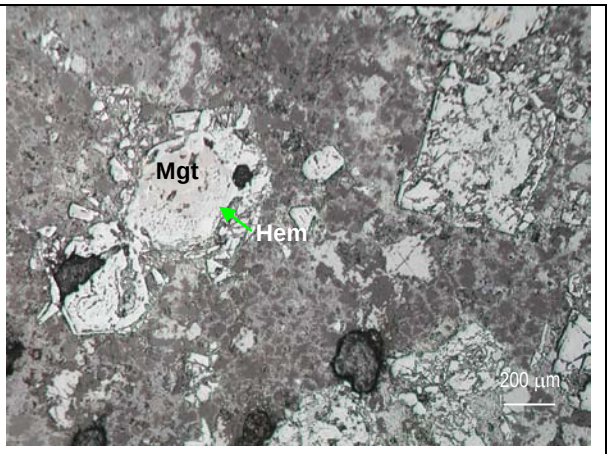


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 5x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados de calcite com granularidade fina.

Os processos metassomáticos tardios fazem-se sentir localmente com maior intensidade dando origem a veios que cortam a matriz carbonatada e que se encontram preenchidos por flúor-carbonatos e fosfatos de ETR.

Abundantes espinelas magnetitícas ocorrem disseminadas, revelando orlas espessas de maghemite/hematite (Fig. 1).

Observações complementares: Boa amostra para quantificação das espinelas Fe em microssonda electrónica no anel calcítico. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #40

Referência: BL-P-19

Coordenadas: 603209; 8657067

Local: Bailundo

Associação mineral principal: anquerite (Anq), (hidr)óxidos Fe

Associação mineral acessória: pirocloro, quartzo

Classificação: Carbonatito anquerítico

Descrição:

Carbonatito anquerítico com granularidade fina a média, localmente grosseiro (Fig. 2); apresenta ainda pequenos grãos disseminados de pirocloro euédrico.

Rede de veios preenchidos por quartzo com granularidade fina, os quais cortam a matriz carbonatada. O quartzo desenvolve-se intersticialmente nos domínios carbonatados como resultado dos processos tardios de silicificação.

Geóide de mineral prismático, com tintas de birrefrangência altas, incolor, que se identifica como anquerite (Fig. 1).

Localmente, as espinelas magnetíticas revelam forte oxidação, sendo localmente substituídas por (hidr)óxidos Fe resultado de transformações tardias (metassomatismo).

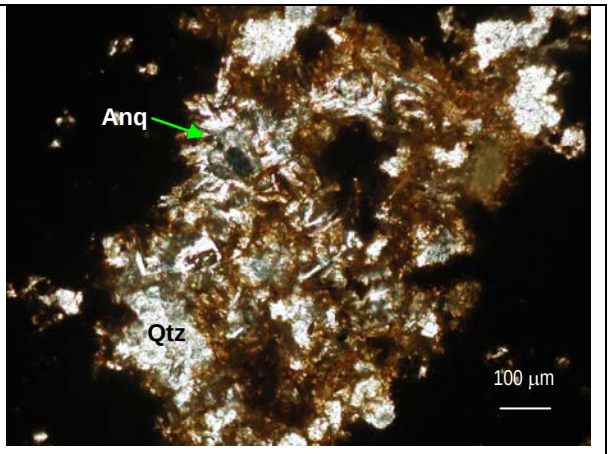


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

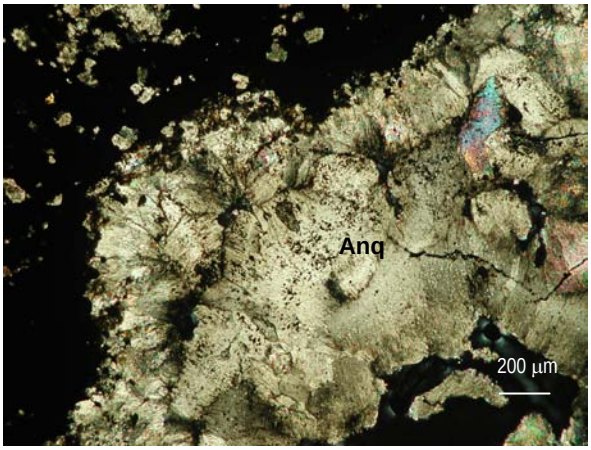


Figura 2. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 5x)

Observações complementares: A identificação óptica dos possíveis minerais carece de confirmação pela análise de microssonda electrónica. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #41

Referência: BL-P-27

Coordenadas: 604019; 8657083

Local: Bailundo

Associação mineral principal: calcite (Cal), hidróxidos Fe (goethite (Gt))

Associação mineral acessória: quartzo, flúor-carbonatos ETR (parisite), hematite

Classificação: carbonatito calcítico

Descrição:

Carbonatito calcítico com granularidade média a grosseira cortado por veios cujo desenvolvimento é síncrono das transformações tardias; estas últimas estruturas são preenchidas por flúor-carbonatos ETR de grão fino, e (hidr)óxidos Fe (Fig. 1).

Ocorrência de quartzo com granularidade média a grosseira nos interstícios da matriz carbonatada, consequência de processos tardios de silicificação.

Agregados minerais de grão fino de morfologia esferoidal, radial e fibrosa, disseminado na matriz, foi identificado como flúor-carbonato de Ca e ETR (parisite) (Fig. 1 e 2).

Ocorrem ainda espinelas magnetíticas invariavelmente oxidadas, apresentando orlas espessas de maghemite/hematite.

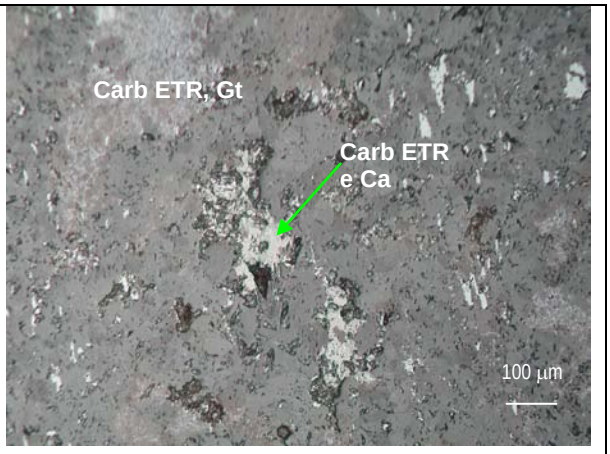


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

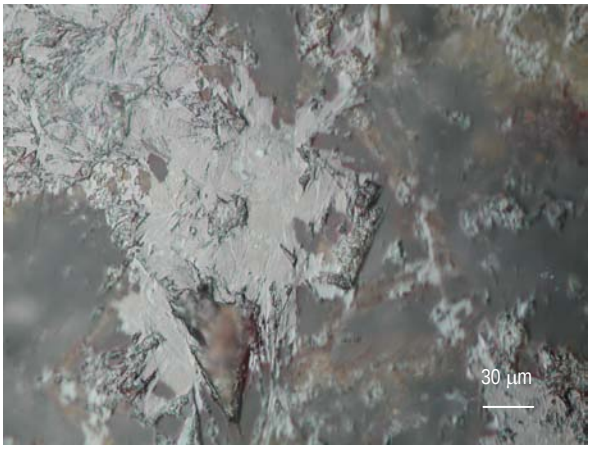


Figura 2. Luz reflectida (ampliação 40x)

Observações complementares: Imperativo a análise de microssonda para confirmação das fases minerais identificadas opticamente como, calcite, flúor-carbonatos ETR. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #42

Referência: BL-P-28

Coordenadas: 604093; 8657215

Local: Bailundo

Associação mineral principal: calcite (Cal), clorite (Clt)

Associação mineral acessória: espinelas Fe, pirite, apatite

Classificação: Carbonatíto calcítico com clorite

Descrição:

Carbonatito calcitico com granularidade grosseira e aspecto muito límpido (Fig. 1 e 2). Quartzo de granularidade média surge nos espaços intersticiais dos carbonatos, resultado de processos de silicificação de fraca intensidade.

Mineral transparente, de cor verde, relevo moderado, tintas de birrefrangência médias, zonamento hexagonal, extinção ligeiramente ondulante nos bordos (resultado da alteração), foi identificado como clorite (confirmado nos estudos de microssonda); estas clorites apresentam evidências de corrosão e são parcialmente substituídas pelo carbonato matricial (Fig. 1 e 2).

Localmente, foram identificados grãos de apatite disseminados na matriz.

As espinelas magnetíticas desenvolvem disseminações e revelam sinais de oxidação intensa, conduzindo à formação de orlas hematítico-maghemíticas.

Grãos finos (micrométricos) de sulfuretos (pirite) foram ainda reconhecidos, formando disseminações na matriz carbonatada

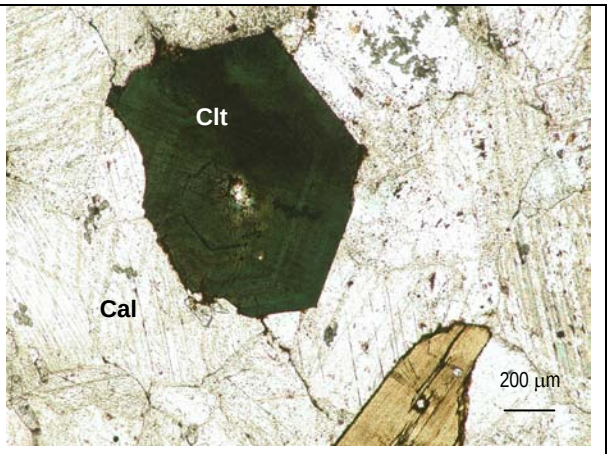


Figura 1. Luz transmitida (ampliação 5x)

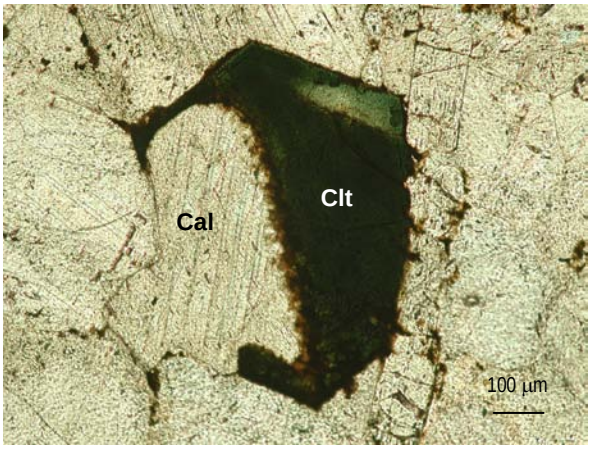


Figura 2. Luz transmitida (ampliação 10x)

Observações complementares: Boa lâmina para quantificação de silicatos na análise de microssonda electrónica. Confirmação da identificação óptica das clorites, assim como da calcite da matriz. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #43

Referência: BL-P-29

Coordenadas: 604128; 8657324

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Calcite, quartzo (Qtz), pirocloro (Pcl)

Associação mineral acessória: flúor-carbonatos ETR, (hidr)óxidos Fe

Classificação: carbonatito calcítico silicificado

Descrição:

Matriz constituida por agregados grosseiros de calcite com aspecto límpido, intercrescidos com quartzo de grão grosseiro sub-euédrico (Fig 2) e quartzo xenomórfico, resultado de forte silicificação.

Pirocloros de grandes dimensões euédricos surgem disseminados na matriz carbonatada; encontram-se fracturados (Fig. 1) e preenchidos por quartzo e flúor-carbonatos ETR provenientes de transformações tardias (silicificação e carbonatação).

Espinelas Fe, invariavelmente oxidadas, apresentando orlas de maghemite/hematite e parcilmente corroídas por agregados de quartzo. Desenvolvimento tardio, normalmente controlado por fracturas irregulares, de agregados ricos em (hidr)óxidos de Fe.

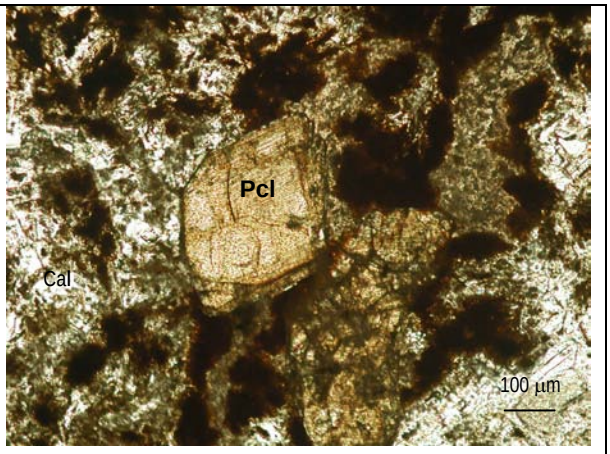


Figura 1. Luz transmitida (ampliação 10x)

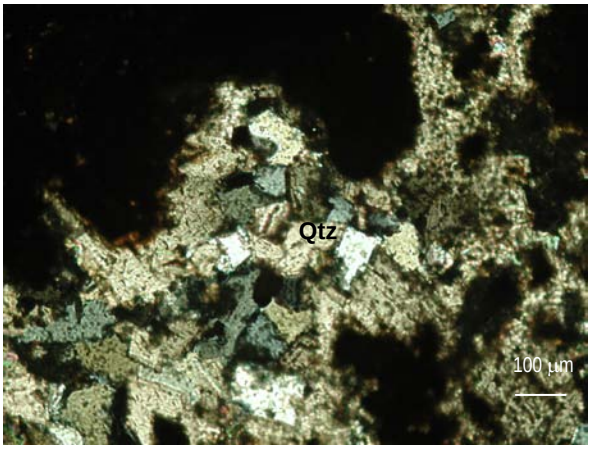


Figura 2. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

Observações complementares: confirmação na análise de microssonda electrónica das fases minerais identificadas opticamente como calcite. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #44

Referência: BL-P-30

Coordenadas: 604340; 8656918

Local: Bailundo

Associação mineral principal: calcite (Cal), pirocloro, hematite, goethite

Associação mineral acessória: quartzo? (Qtz), barite? (Brt) e pirite

Classificação: Carbonatito calcítico

Descrição:

Carbonatito calcítico com granularidade grosseira de aspecto límpido, apresentando disseminação significativa de pirocloro (grãos euédricos) (Fig. 3).

Transformações tardias dão origem a veios e filonetes preenchidos por silicatos de granularidade fina a média, possivelmente acompanhados por barite (Fig. 1).

Frequentes domínios ricos em óxidos de ferro primários, os quais se encontram invariavelmente oxidados, apresentado orlas espessas de maghemite/hematite (Fig. 2).

Existência de sulfuretos micrométricos (pirite) disseminados na matriz carbonatada.

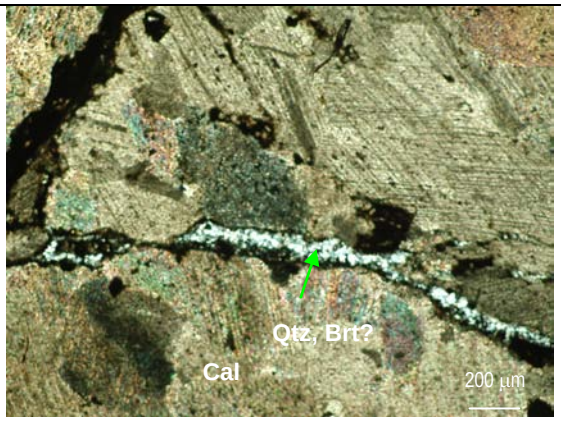


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 5x)

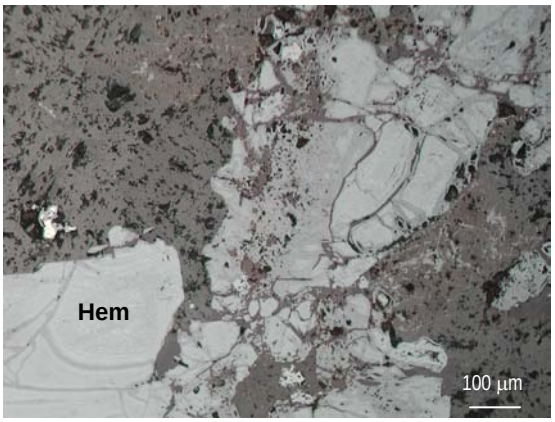


Figura 2. Luz reflectida (ampliação 10x)

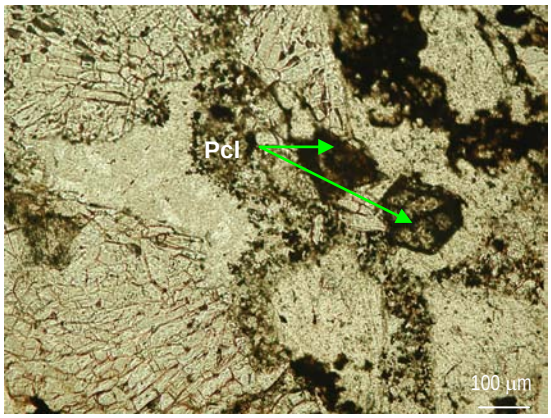


Figura 3. Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: Boa lâmina para quantificação de espinelas Fe no domínio do carbonatito calcítico. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #45

Referência: BL-P- 39

Coordenadas: 604048; 8656113

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonatos (calcite, bastnäsite, parisite, synchysite, estroncianite), (hidr)óxidos de ferro (magnetite/hematite/goethite), óxidos de Mn (e Pb), pirocloro (Pcl)

Associação mineral acessória: witherite e/ou barite

Classificação: Carbonatito calcítico

Descrição:

Matriz constituida por agregados relativamente grosseiros de calcite que, localmente, são substituidos por intercrescimentos de (flúor)-carbonatos ETR e hidróxidos Fe (Fig. 1).

No seio da matriz calcítica ocorrem numerosos grãos disseminados de pirocloro (Fig. 1 e 2), bem como de magnetite. Este último óxido apresenta orlas de oxidação evidente, sendo substituído por maghemite/hematite.

O desenvolvimento tardio, normalmente controlado por fracturas irregulares, de agregados ricos em goethite faz-se acompanhar por (hidr)óxidos de manganês cuja análise qualitativa em microssonda electrónica revela conter quantidades não negligenciáveis de Zn.

A análise de microssonda confirma a presença de intercrescimentos entre flúor-carbonatos ETR e witherite e/ou barite.

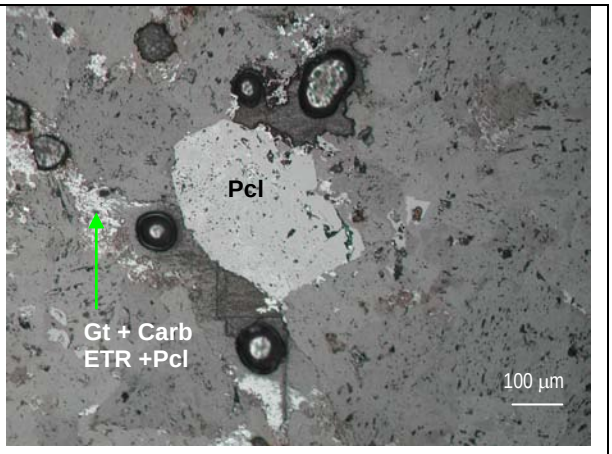


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x).

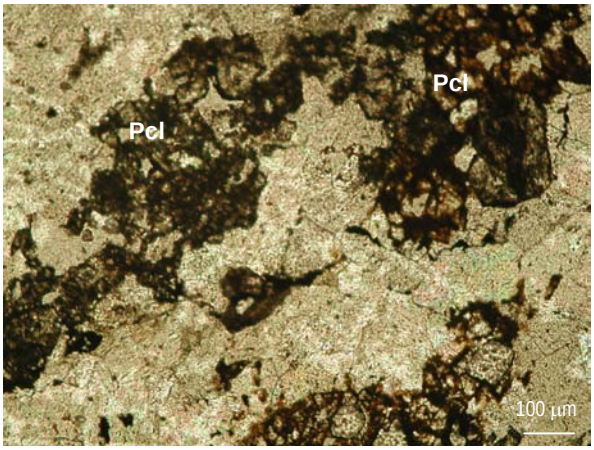


Figura 2. Luz transmitida, polaróides paralelos.

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #46

Referência: BL-P- 49

Coordenadas: 603895; 8655806

Local: Bailundo

Associação mineral principal: quartzo (Qtz), piroxena (Px)

Associação mineral acessória: (hidr)óxidos Fe

Classificação: Carbonatito silicificado

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo com granularidade essencialmente média (Fig. 1), muito embora o desenvolvimento local de grão fino a grosseiro seja possível. A existência de matriz constituída por quartzo demonstra a existência de transformações tardias (metassomáticas), como processos de silicificação. Espacialmente esta amostra situa-se na fronteira com o complexo de fenitização, corroborando a ideia de silicificação acentuada.

Mineral transparente, castanho, de hábito acicular, com granularidade fina, foi identificado como piroxena (confirmado em análise de microssonda) (Fig. 1); pela sua disposição na lâmina e relação estabelecida com outros minerais, sugere ser um mineral de substituição resultante da progradação dos processos metassomáticos.

Verifica-se ainda a existência de alguns, poucos, (hidr)óxidos Fe que se encontram disseminados pela matriz, possivelmente como fase tardia.

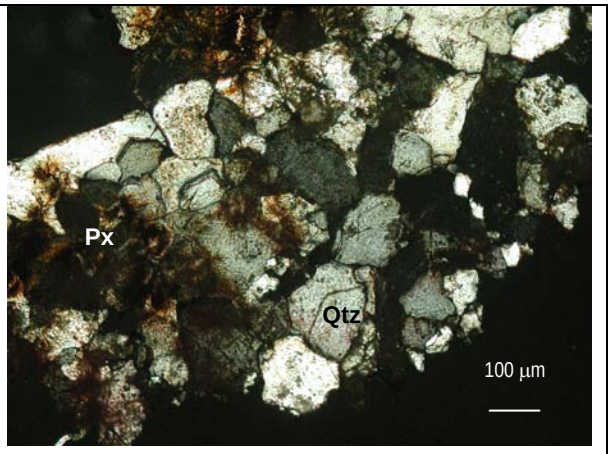


Figura 1. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 10x)

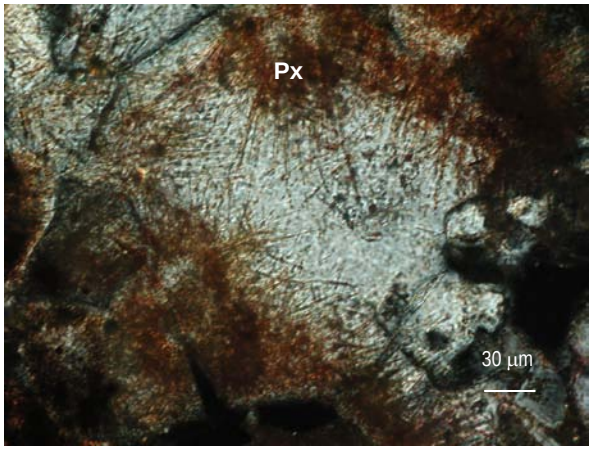


Figura 2. Luz transmitida com polaróides cruzados (ampliação 40x)

Observações complementares: mineral castanho que apresenta hábito acicular de granularidade fina a confirmar na análise de microssonda electrónica. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA # 47

Referência: BL-P- 52

Coordenadas: 604110; 8655633

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo, (hidr)óxidos Fe (goethite (Gt)), hematite (Hem)

Associação mineral acessória: Pirocloro, fosfatos ETR e flúor-carbonatos

Classificação: Carbonatito siderítico silicificado

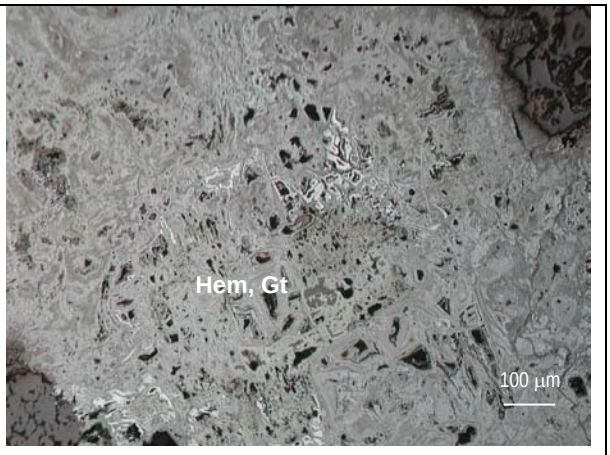


Figura 1. Luz reflectida (ampliação 10x)

Descrição:

Matriz constituída por agregados de quartzo com granularidade média a grosseira. A abundância de quartzo e a raridade de carbonatos na matriz demonstra a importância dos efeitos decorrentes do metassomatismo, neste caso em domínios próximos ao complexo de fenitização.

Localmente, (hidr)óxidos de Fe surgem com texturas dendríticas a substituir a matriz carbonatada; possivelmente, um fenómeno tardio de hematitização da siderite (Fig. 1).

Raros pirocloros euédricos, parcialmente alterados, ocorrem disseminados na matriz. Filonetes tardios preenchidos com fostatos e flúor-carbonatos de ETR cortam a matriz.

Observações complementares: A confirmar na análise de microssonda a fase mineral pirocloro, assim como os fosfatos ETR e os flúor-carbonatos

FICHA #48

Referência: BL-P- 53

Coordenadas: 604544; 8655500

Local: Bailundo

Associação mineral principal: calcite, silicatos (quartzo)

Associação mineral acessória: fluór-carbonatos ETR, óxidos de Mn e Ba (romanechite)

Classificação: Carbonatito calcítico metassomatizado

Descrição:

Carbonatito calcítico com granularidade média a grosseira revelando efeitos de alteração intensa e substituição por silicatos (quartzo) intersticiais com granularidade fina.

Mineral transparente, castanho, de hábito acicular, com granularidade fina, identificado como mistura entre fluór-carbonatos ETR e óxidos Mn e Ba (Fig. 1 e 2); a sua disposição na lâmina e relação estabelecida com outros minerais, sugere ser um mineral de substituição resultado de transformações tardias (metassomatismo).

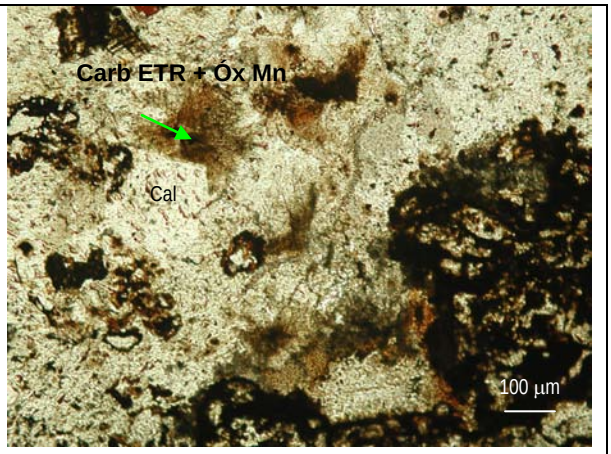


Figura 1. Luz transmitida (ampliação 10x)

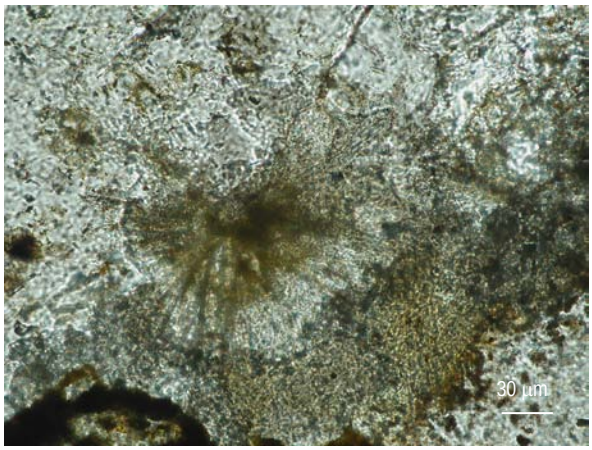


Figura 2. Luz transmitida (ampliação 40x)

Observações complementares: Os carbonatos carecem de confirmação da análise de microssonda.

FICHA #49

Referência: BL-P- 54

Coordenadas: 604586; 8655487

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonatos (calcite (Cal)), moscovite (Ms) piroxenas (aegirina-augite (Ae-Au)), feldspatos (Albite (Ab)).

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e hematite (Hem)

Classificação: Carbonatito Calcítico

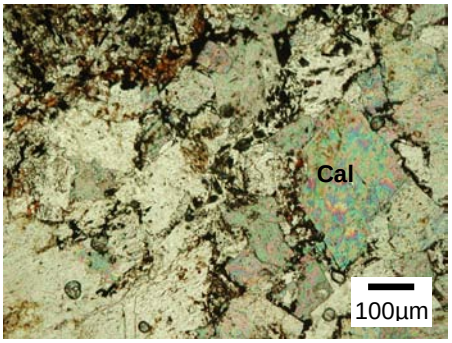


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

Descrição:

Carbonatito calcítico com granularidade grosseira (fig. 1) cuja matriz é constituída por calcite; ocorrem fases silicatadas com uma direcção de clivagem perfeita e tintas de birrefrangência de 2ª a 3ª ordem, interpretadas como moscovites (fig. 2). Outros silicatos verde pálido, de dimensão reduzida, relevo elevado e birrefrangência elevada (2ª ordem) são observados, sendo interpretados como piroxenas (aegirina-augite) (fig. 3). Minerais incolores com baixa birrefrangência (cinzento claro de 1ª ordem) são interpretados como sendo albite límpida sem maclas (fig. 4).

Abundantes (hidr)óxidos de Fe e relíquias de hematite são observados por toda a rocha (fig. 2).

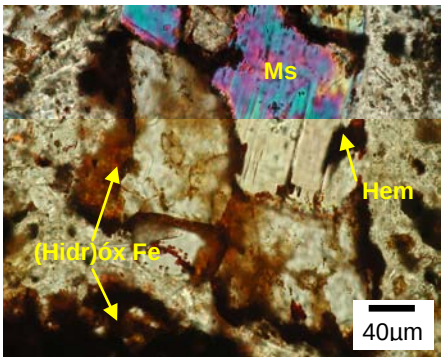


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos (em baixo) e cruzados (em cima)

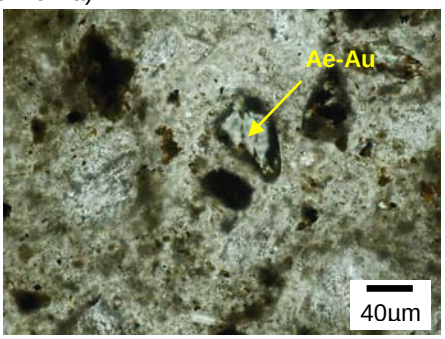


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

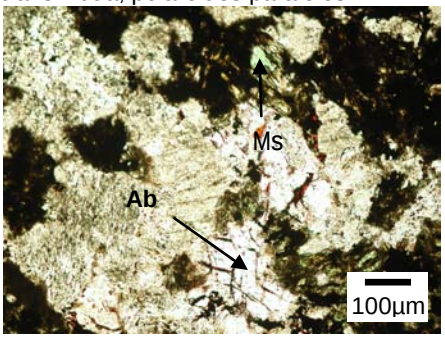


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: Seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

3. *FENITOS*

FICHA #50

Referência: BL-P-61

Coordenadas: 600938; 8655879

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld), quartzo (Qtz) e piroxenas (aegirina-augite (Ae-Au)).

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e hematite (Hem)/magnetite (Mgt).

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito de granularidade média a grosseira, cuja matriz silicatada é constituída por abundantes feldspatos grosseiros; os efeitos da silicificação tardia são relativamente frequentes, conduzindo ao desenvolvimento de agregados de quartzo com granularidade fina (fig. 1).

Veios que cortam os feldspatos são constituídos por grãos de quartzo e óxidos que devem corresponder a hematite/magnetite (relíquias do processo de alteração que dá origem aos (hidr)óxidos de Fe) (fig. 1 e 2). Abundantes (hidr)óxidos de Fe dispostos em redes anastomosadas (fig. 1 e 3).

Minerais de hábito prismático alongado, pleocroísmo fraco de incolor a esverdeado e tintas de birrefrangência elevada foram identificados como piroxenas (aegirina-augite) e associam-se aos agregados de quartzo tardio (fig. 4).

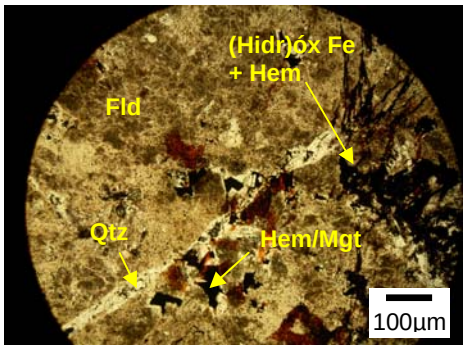


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

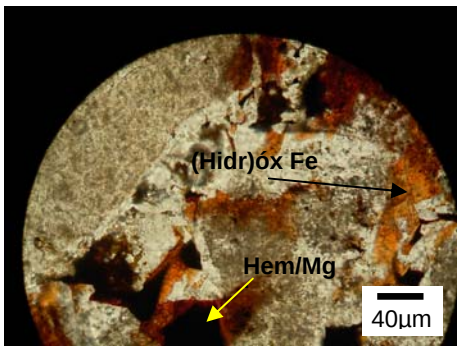


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

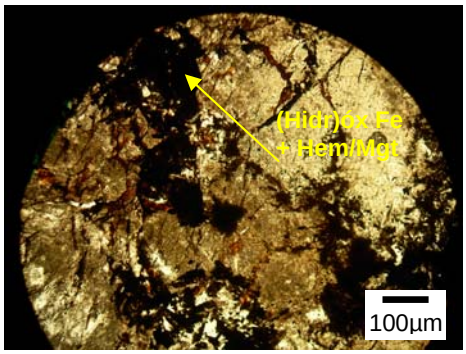


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

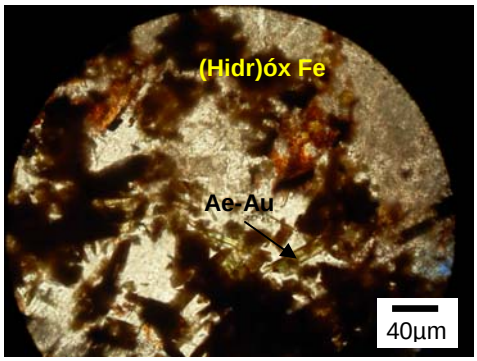


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica. Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica.

FICHA #51

Referência: BL-P-62

Coordenadas: 600895; 8655907

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld), quartzo (Qtz), piroxena (aegirina-augite (Ae-Au))

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e hematite (Hem)/magnetite (Mgt).

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade fina a média, cuja matriz silicatada é constituída por abundantes feldspatos de granularidade média; os efeitos da silicificação tardia são relativamente frequentes e conduzem ao desenvolvimento de agregados de quartzo com granularidade fina (fig. 1).

Veios que cortam a matriz silicatada são constituídos por grãos de quartzo, hematite e (hidr)óxidos de Fe dispostos nos bordos (fig. 1 e 2) e interior do veio (fig. 3). Abundantes (hidr)óxidos de Fe disseminados pela rocha e em redes anastomosadas.

Minerais sub-euédricos de hábito lamelar evidenciando secções octogonais, relevo elevado, pleocroísmo fraco de verde pálido a castanho-amarelado e tintas de birrefrangência elevadas são observados em associação com as fases silicificadas; correspondem a piroxenas (aegirina-augite) (fig. 3 e 4).

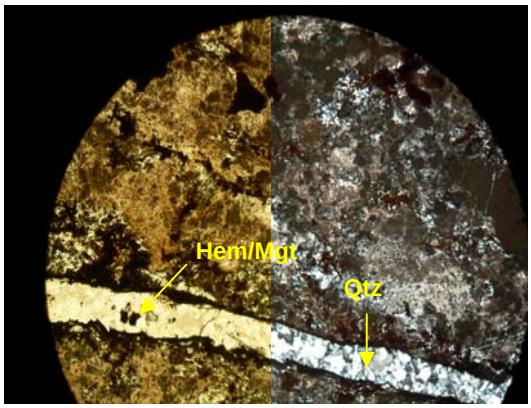


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

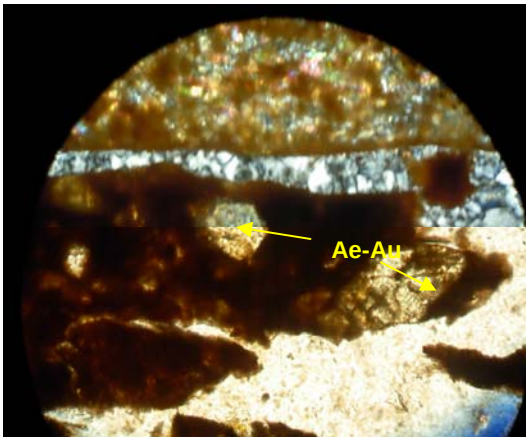


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos (em baixo) e cruzados (em cima)

Observações complementares: seleccionada para análise microssonda electrónica.

FICHA #52

Referência: BL-P-63

Coordenadas: 600771; 8655873

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspato (Fld), quartzo (qtz), moscovite (Ms) e piroxenas (aegirina-augite (Ae-Au)).

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e hematite (hem)/magnetite(Mgt).

Classificação: Fenito

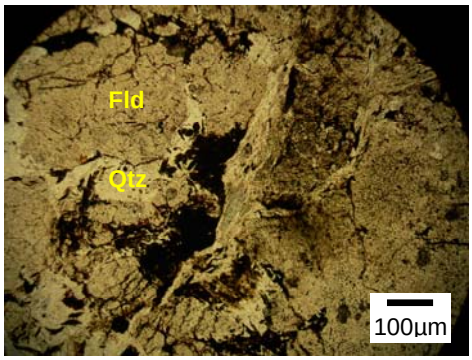


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

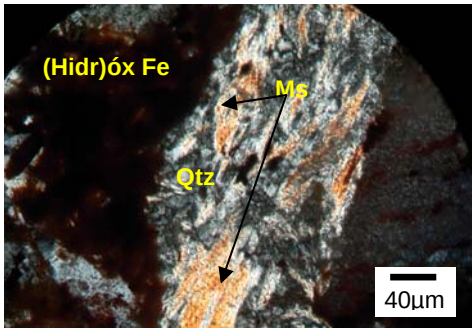


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides cruzados

Descrição:

Fenito com granularidade grosseira de matriz silicatada constituída essencialmente por cristais de feldspato grosseiro, subédrico a anédrico e quartzo anédrico em grãos de dimensão fina a média (fig. 1 e 2).

Agregados minerais de grão fino e aspecto fibroso, incolores, relevo moderado e birrefrangência elevada (tintas de 2ª ordem), associados às fases silicatadas correspondem a moscovite (fig. 2).

Minerais de hábito prismático alongado, tintas de birrefrangência elevada são piroxenas e encontram-se em associação com os agregados de quartzo tardio (fig. 3 e 4).

(Hidr)óxidos de Fe continuam a ser abundantes, ocorrendo de forma disseminada, possivelmente resultando da alteração de hematite (figs. 2 e 4).

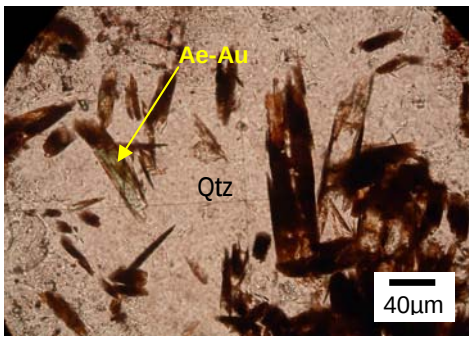


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

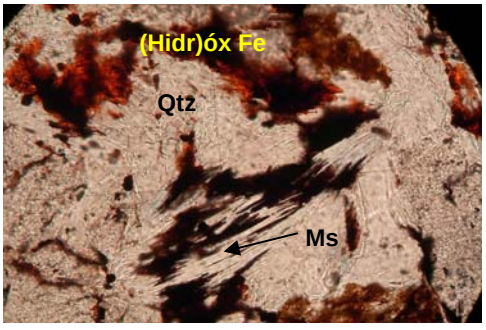


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides aralelos

Observações complementares: seleccionada para análise microssonda electrónica.

FICHA #53

Referência: BL-P-65

Coordenadas: 600625; 8655991

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonatos (calcite? (Cal)), feldspatos (Fld)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito de granularidade média e matriz carbonatada (calcite?) (fig. 1).

Numerosos minerais incolores com dimensões muito reduzidas e relevo alto desenvolvem disseminações matriciais; as características ópticas e dimensão muito reduzida não permitem a sua classificação fidedigna, nem mesmo por microssonda electrónica visto não se apresentarem aflorantes à superfície (fig. 1).

Minerais euédricos de hábito tabular, tintas de birrefrangência baixa (cinzentos de 1ª ordem), 1 direcção de clivagem perfeita são observados em veios e correspondem a feldspatos (figs. 2 e 3).

Registam-se ainda abundantes (Hidr)óxidos de Fe, distribuindo-se pela matriz da rocha (fig. 2 e 3) e veios (fig. 3).

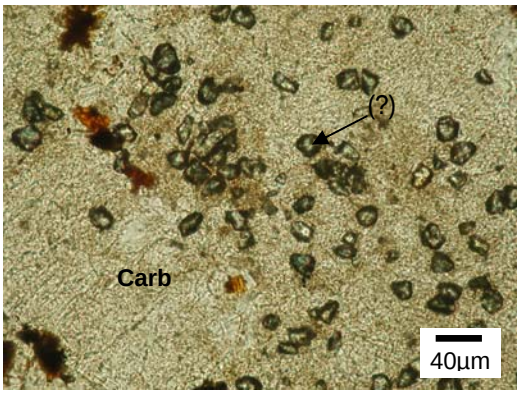


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

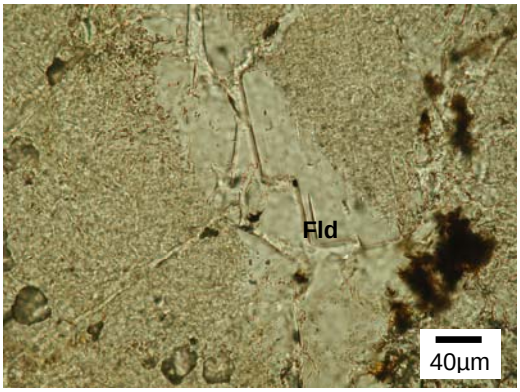


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

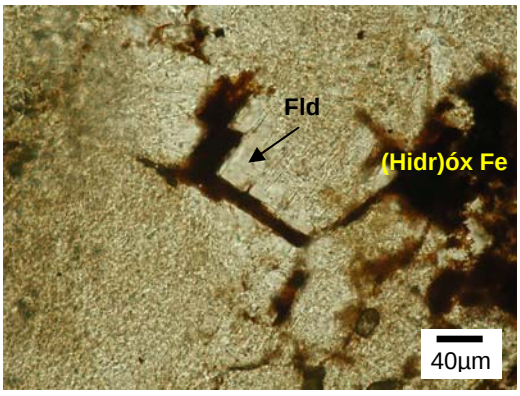


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica.

FICHA #54

Referência: BL-P-66

Coordenadas: 600610; 8655962

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld) e quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e silicato (?)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito de granularidade fina a média, matriz silicatada constituída por feldspato e em menor abundância quartzo de granularidade fina (fig. 1).

Mineral verde-amarelado, prismáticos e hábito alongado, associados às fases silicatadas (nomeadamente, quartzo) (fig. 2); as características ópticas não permitem a sua classificação precisa pelo que se torna importante recorrer à microssonda electrónica, visto ser um mineral não muito abundante mas presente noutras amostras.

Fracturas preenchidas por quartzo, mineral verde-amarelado descrito anteriormente e (hidr)óxidos de Fe dispostos nos bordos e interior das fracturas (fig. 3 e 4).

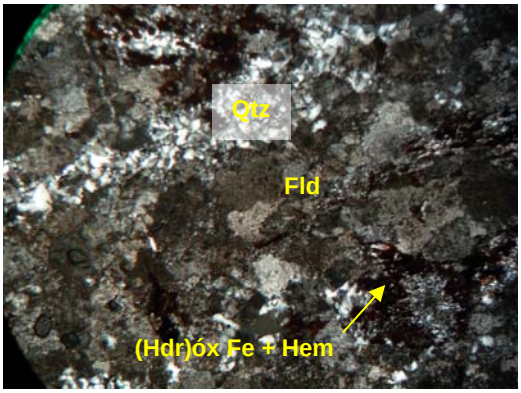


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

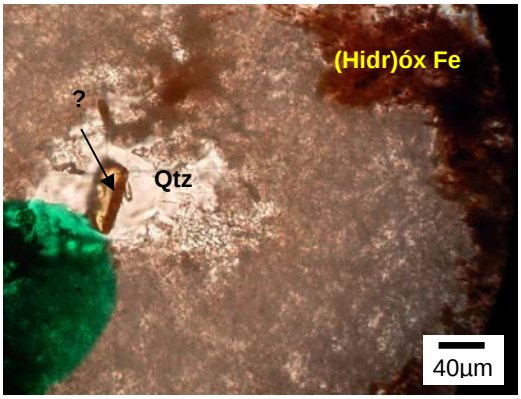


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

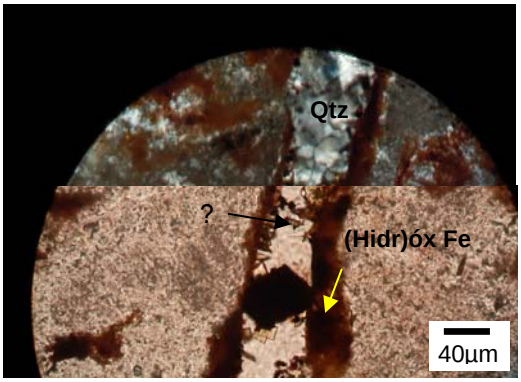


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos (em baixo) e cruzados (em cima)

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

FICHA #55

Referência: BL-P-67

Coordenadas: 600589; 8655958

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld) e quartzo (Qtz).

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe, óxidos de titânio, anátase (Ant) ou brookite (Brk)) e hematite (Hem)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade fina a média, cuja matriz silicatada é constituída por feldspato e quartzo (fig. 1).

Coexistindo com a matriz silicatada destaca-se a presença de minerais castanho-amarelado, hábito anédrico, duas direcções de clivagem bem marcada e fraco pleocroísmo; tratam-se de óxidos de titânio, possível anátase ou brookite (fig. 2). As características ópticas não são suficientemente precisas para a identificação inequívoca do mineral.

Mineral zonado castanho-amarelado em associação com as fases silicificadas (quartzo), de hábito euédrico correspondem a (hidr)óxidos de Fe (fig. 3).

Hidr)óxidos de Fe (goethite/hematite) tardios encontram-se disseminados na rocha, muitas vezes em associação com as fases silicatadas (fig. 1).

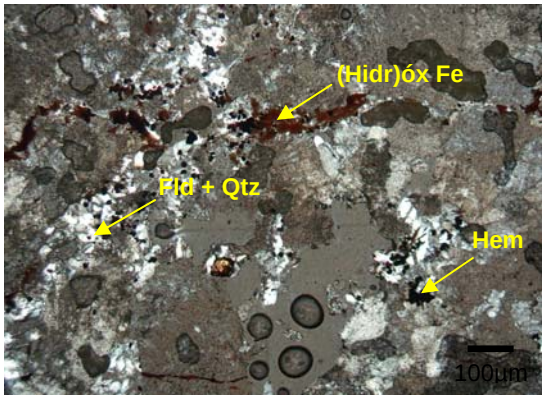


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

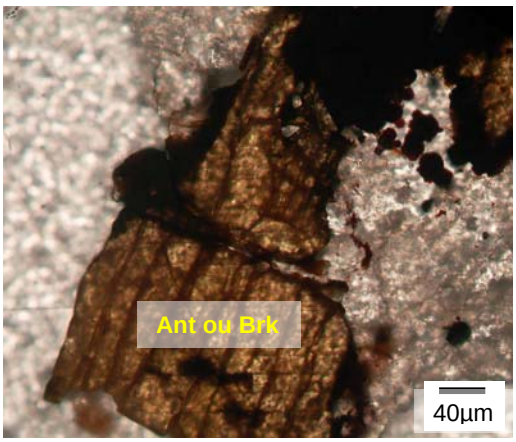


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

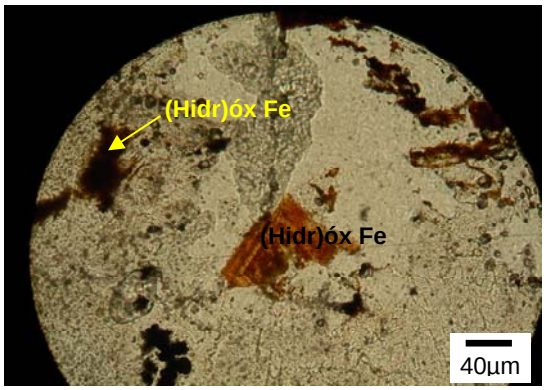


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para análise microssonda electrónica.

FICHA #56

Referência: BL-P-69

Coordenadas: 600227; 8656499

Local: Bailundo

Associação mineral principal: quartzo (Qtz) e anfíbolas? (Anf)

Associação mineral acessória: (hidr)óxidos de Fe (Goethite (Gt)/Hematite (Hem))

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade fina a média, cuja matriz silicatada é constituída essencialmente por minerais incolores, sem clivagem, de hábito anédrico, baixo relevo e birrefrangência (cinzentos de 1ª ordem) identificados como quartzo (Figs. 1 e 2).

Associado aos grãos de quartzo ocorre um mineral castanho pálido, de hábito fibroso; poderá corresponder a anfíbolas alcalino-sódicas fortemente silicificadas, pelo que não foi possível obter uma análise fidedigna por microssonda electrónica (figs. 1 e 2)

Fases carbonatadas inexistentes.

Observam-se ainda fases microcristalinas, castanho-avermelhadas que correspondem ao desenvolvimento tardio de (hidr)óxidos de Fe, resultantes da alteração de hematite para goethite (figs. 2 e 3). Estas fases tardias ocorrem também como preenchimentos de fracturas em redes anastomosadas (fig. 2).

Fracturas que cortam a matriz, preenchidas por quartzo, (hidr)óxidos de Fe e pequenos grãos opacos que parecem corresponder a relíquias de hematite, são comuns na rocha (fig. 3).

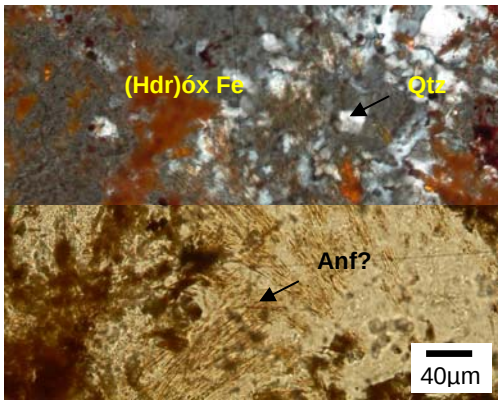


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados (em cima) e paralelos (em baixo)

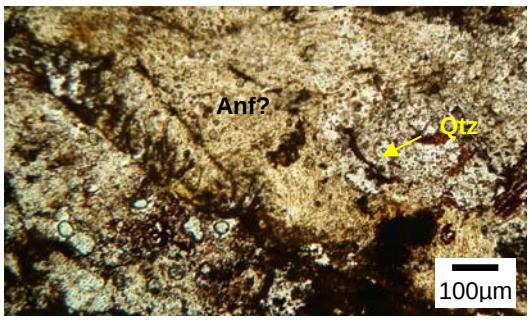


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

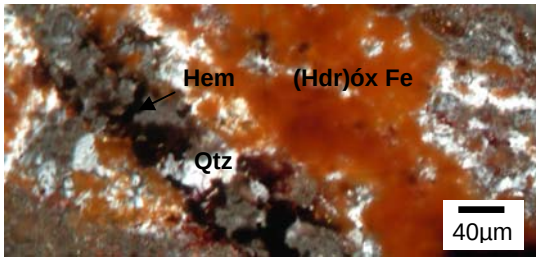


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides cruzados

Observações complementares: seleccionada para análise de microssonda electrónica.

FICHA #57

Referência: BL-P-70

Coordenadas: 600248; 8656363

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspato (microclina (Mcl) e albite (Ab)), quartzo (Qtz) e anfíbola (Anf?)

Associação mineral acessória: (hidr)óxidos de Fe (Goethite (Gt)/Hematite (Hem))

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade grosseira, cuja matriz essencialmente silicatada é constituída por grãos de feldspato e, em menor quantidade, quartzo anédrico (fig. 1).

Um número significativo de feldspatos, exibindo maclas com um padrão "axadrezado" típico, permitem classificá-los como microclina (fig. 1).

Mineral incolor, límpido sem clivagem, com tintas de birrefrangência baixa (cinzentos de 1ª ordem) pode corresponder a albite não maclada. Associado a este agregado encontra-se um outro mineral castanho pálido que pode ser identificado como possível anfíbola (fig. 2)

Os produtos microcristalinos castanho-avermelhados correspondentes à alteração da hematite são classificados como (hidr)óxidos de Fe e ocorrem em toda a rocha (fig. 3 e 4), muitas das vezes constituindo o essencial dos preenchimentos das redes anastomosadas de fracturas (figs 1).

Fases carbonatadas inexistentes.

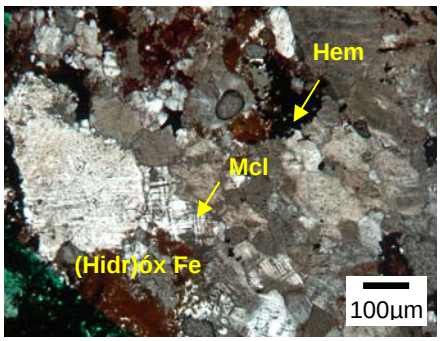


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

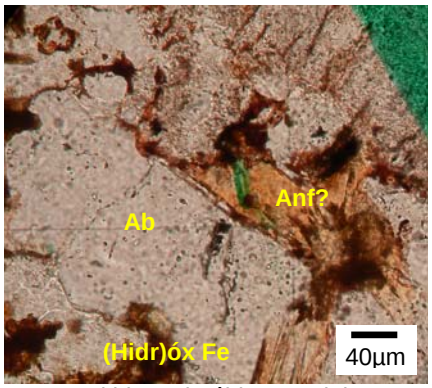


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

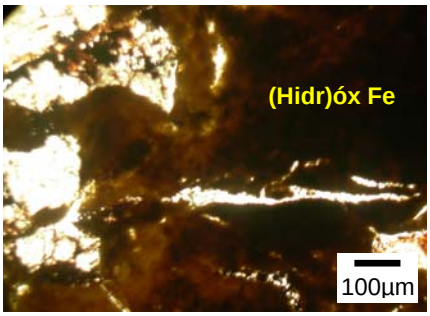


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

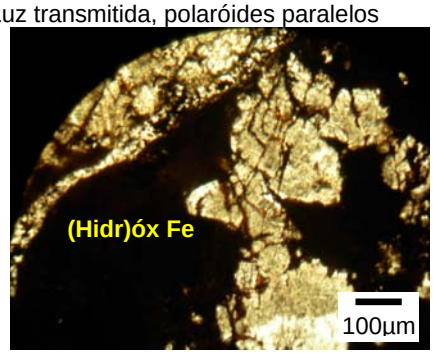


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides paralelos

Ficha #58

Referência: BL-P-71

Coordenadas: 600313; 8656168

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld), quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (hidr)óxidos de Fe (Goethite (Gt)/lepidocrocite? (Lep)), hematite (Hem) e barite (Brt)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito de granularidade grosseira, cuja matriz essencialmente silicatada constituída por feldspatos (fig.1) anédricos e, em menor quantidade quartzo. Minerais incolores com três direcções de clivagem, birrefrigência baixa preenchem uma fractura e correspondem a barite (fig. 2).

Fases carbonatadas inexistentes.

(Hidr)óxidos de Fe (goethite/lepidocrocite) (minerais avermelhados-alaranjados) tardios são abundantes e devem o seu desenvolvimento à alteração tardia experimentada pela hematite (fig. 3 e 4).

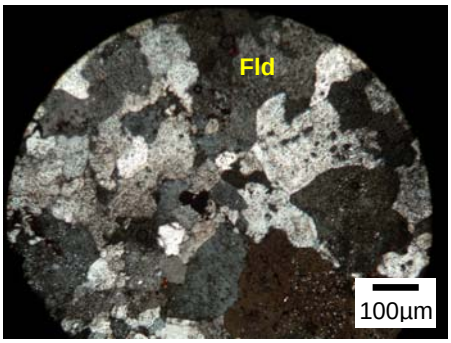


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

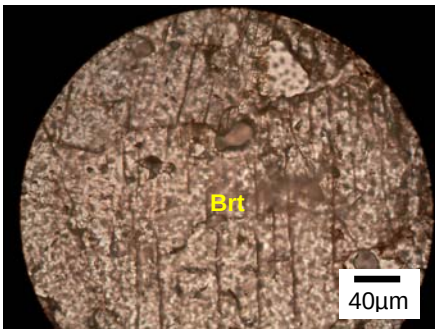


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

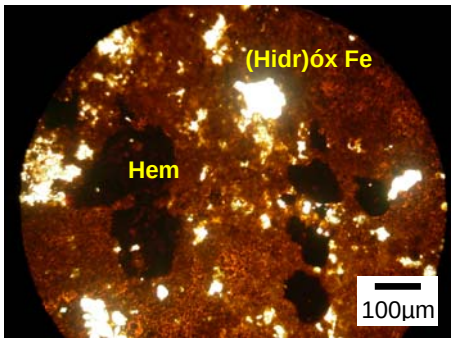


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

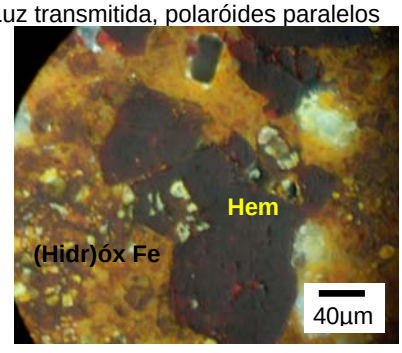


Fig. 4: Luz reflectida, polaróides cruzados

Observações: seleccionada para litogeoquímica e análise de microssonda electrónica.

Ficha #59

Referência: BL-P-72

Coordenadas: 600367; 8656013

Local: Bailundo

Associação mineral principal: quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (hidr)óxidos Fe

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade média a grosseira de matriz silicatada constituída essencialmente por quartzo.

Observam-se orlas radiais de um mineral incolor e birrefrangência baixa (cinzentos 1ª ordem) que corresponde a um crescimento secundário de quartzo em espaço aberto (fig. 1, 2 e 3).

Fases carbonatadas inexistentes.

A presença de (Hidr)óxidos de Fe é escassa.

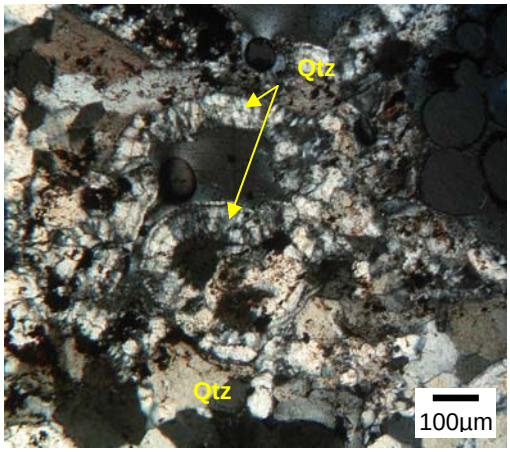


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

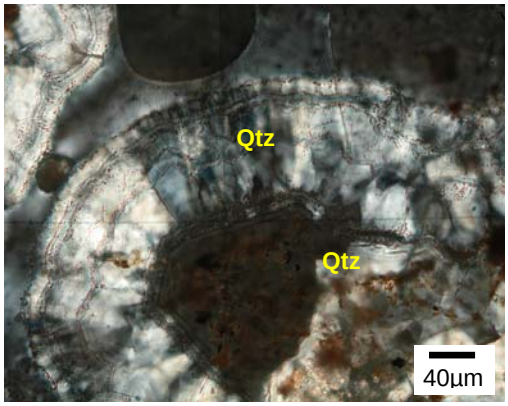


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides cruzados

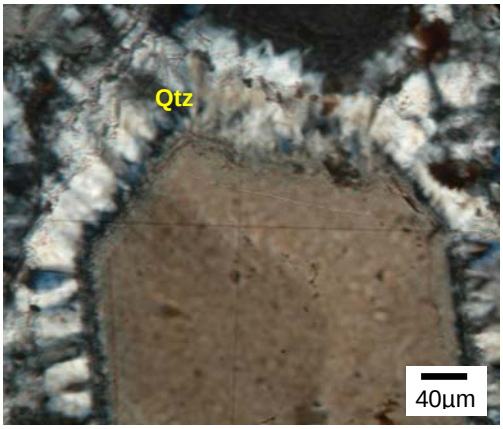


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides cruzados

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

FICHA #60

Referência: BL-P-73

Coordenadas: 60064.6; 8656680.3

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspato (Fld), quartzo (qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e hematite (Hem).

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade grosseira e matriz silicatada essencialmente constituída por feldspato grosseiro, alguns grãos exibindo maclas com um padrão "axadrezado" típico (microclina; fig. 1), e quartzo microgranular (fig. 1 e 2).

Secções subédricas de (hidr)óxidos de Fe (minerais castanho-amarelados) de granularidade muito grosseira são observadas nesta rocha (fig. 3). Relíquias de hematite (fig. 4) encontram-se por vezes associadas aos veios de quartzo (fig. 3).

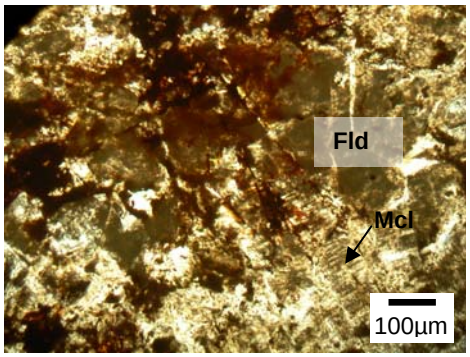


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

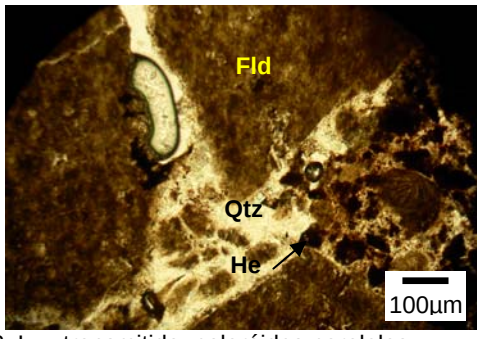


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

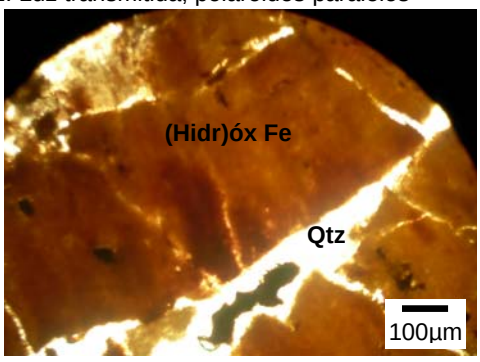


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

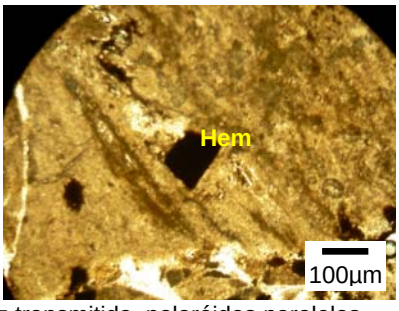


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

FICHA #61

Referência: BL-P-74

Coordenadas: 600108; 8656559

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspato (Fld) (microclina (Mcl)), quartzo (qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e hematite (Hem).

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade grosseira e matriz silicatada constituída essencialmente por feldspato grosseiro, alguns grãos exibindo maclas com um padrão "axadrezado" típico que permitem classificá-los como microclina (fig. 1), e quartzo com granularidade fina a grosseira (fig. 1 e 2).

Associados às fases silicificadas, desenvolvem-se abundantes agregados ricos em goethite (massas castanho-avermelhadas) que se fazem acompanhar por outros (hidr)óxidos de Fe (produtos amarelo-alaranjado) que devem corresponder a lepidocrocite (fig. 2 e 3).

Hematite disseminada em veios de quartzo, ainda que fortemente alterada, pode ser observada. A maioria das fracturas constituintes das redes anastomosadas tardias encontram-se, porém, seladas por (hidr)óxidos de Fe; este tipo de fases é também comum no seio da matriz e corresponde ao produto de substituição de óxidos pré-existentes (fig. 3). Os veios de quartzo que cortam a matriz silicatada são relativamente abundantes (fig. 4).

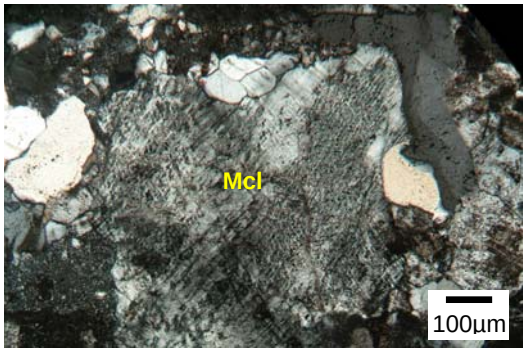


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

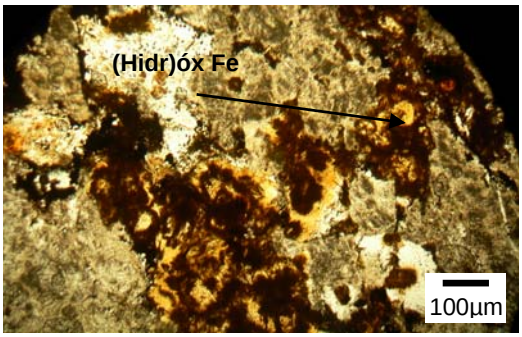


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

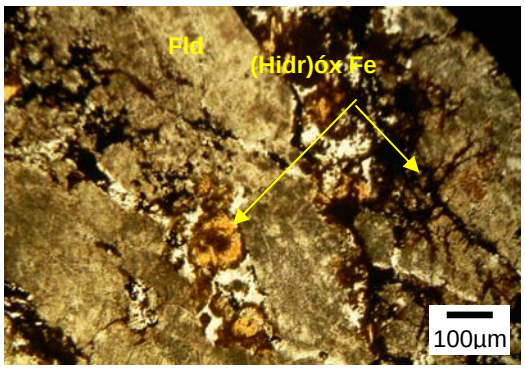


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides pralelos

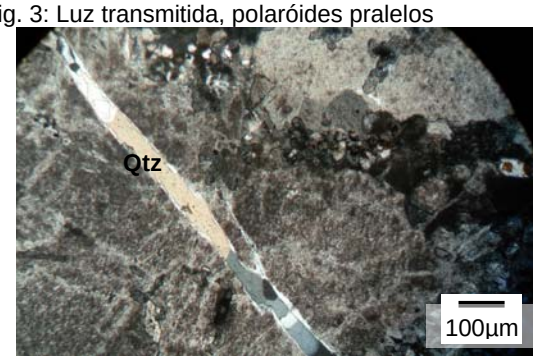


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides cruzados

Observações complementares: seleccionada para análise microssonda electrónica.

FICHA #62

Referência: BL-P-75

Coordenadas: 600404.5; 8656818.8

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonato (Cal),

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe, hematite (Hem) e feldspatóides (Fldt) (?)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito de granularidade média a grosseira, cuja matriz carbonatada é constituída essencialmente por agregados de cristais carbonatados incolores, anédricos e tintas de birrefrangência muito elevada (brancos de ordem superior) que correspondem a calcite (fig. 1).

Duas fases minerais distintas de granularidade grosseira constituem um veio central na lâmina. Ambas as fases são incolores, sendo que uma delas forma agregados de secções euédricas algumas octogonais, baixo relevo, pleocroísmo de incolor a beje e tintas de birrefrangência baixa (cinzentos de 1ª ordem) (figs.3 e 4); a outra fase também incolor euédrica a subédrica não pleocróica, manifesta tintas birrefrangência baixa (cinza escuro a castanho pálido) (figs. 2 e 3). A identificação destas duas fases é difícil; uma proposta de classificação para a primeira é tratar-se de um feldspatóide, nomeadamente pelas características observadas nos cristais ilustrados na fig. 4; o segundo mineral também poderá corresponder a um feldspatóide.

Abundantes agregados ricos em hematite e goethite como produto de substituição de fases óxidas pré-existentes (figs. 3 e 4).

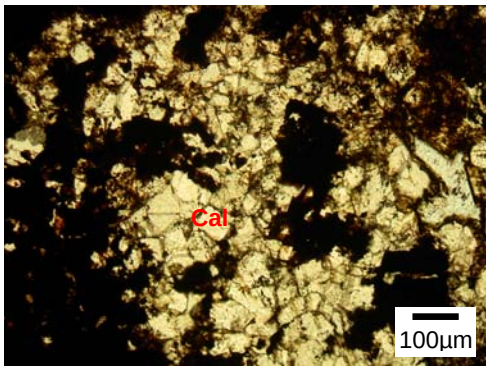


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

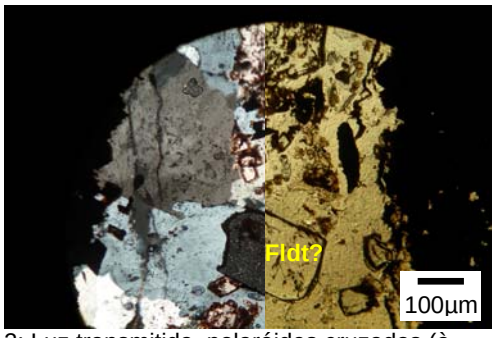


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides cruzados (à esquerda) e paralelos (à direita)

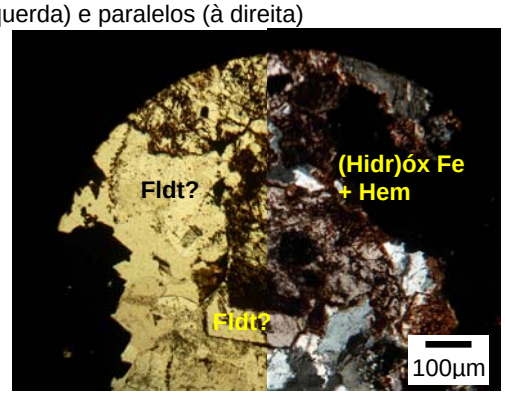


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

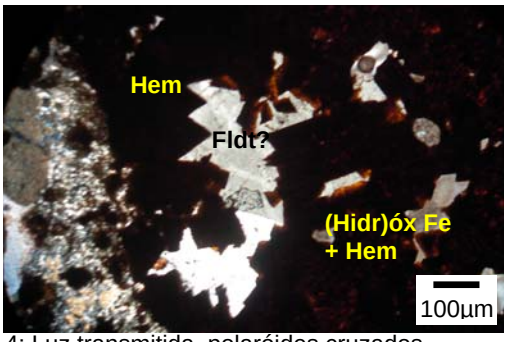


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides cruzados

FICHA #63

Referência: BL-P-76

Coordenadas: 600405.98; 8656816.5

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonatos (Cal)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe, magnetite (Mgt), hematite (Hem), barite (brt) e feldspatóides (?)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade fina a média e matriz carbonatada constituída por agregados de cristais incolores, anédricos, com tintas de birrefrangência elevada (brancos de ordem superior) (calcite) (fig. 1). Minerais incolores de granularidade média, em secções anédricas, duas a três direcções de clivagem perfeita parecem corresponder a barite tal como os minerais observados na amostra BL-P-71 (fig. 2).

Veio com mineral anédrico, incolor, exibindo tintas de birrefrangência baixas (cinzento claro de 1ª ordem) que poderá ser interpretado como feldspatóide; em associação surgem grandes cristais de (hidr)óx de Fe que, em algumas zonas, ocupam a totalidade do veio (fig. 3). Surge hematite em micro-bolsadas dispersas na matriz carbonatada (fig. 1), reconhecendo-se os efeitos da sua substituição tardia por (hidr)óxidos (fig. 2). Na figura 4 é possível observar um mineral rosado, aparentemente sem sem reflexões internas, interpretado como provável magnetite a ser substituída, por oxidação, por hematite.

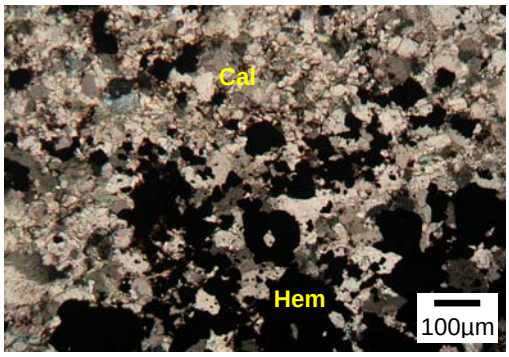


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

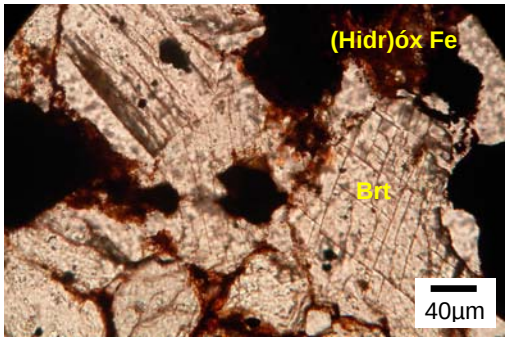


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

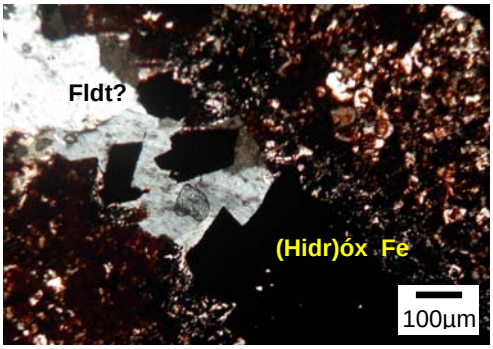


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides cruzados

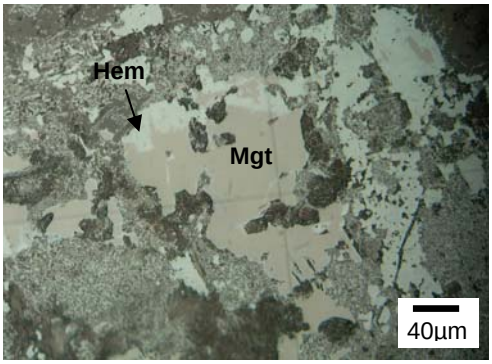


Fig. 4: Luz reflectida, polaróides paralelos

Observações complementares: Lâmina seleccionada para litogeoquímica e análise de microssonda.

Ficha #64

Referência: BL-P-77

Coordenadas: 600320.7; 8656508.9

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade média a grosseira e matriz silicatada essencialmente constituída por agregados incolores e subédricos de quartzo (figs. 1 e 2).

Característica a salientar nesta rocha são as orlas de minerais laranja-amarelados que aparentam corresponder a (hidr)óxidos de Fe (figs. 1, 2 e 3).

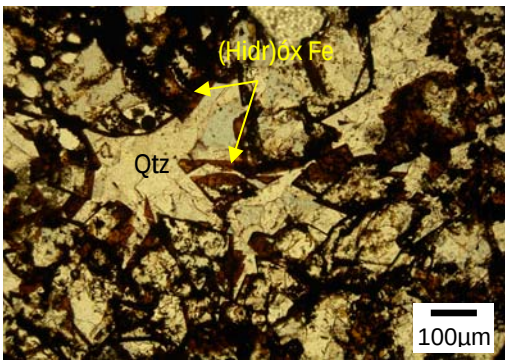


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

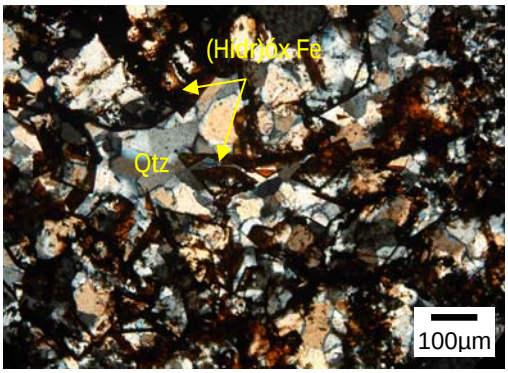


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides cruzados

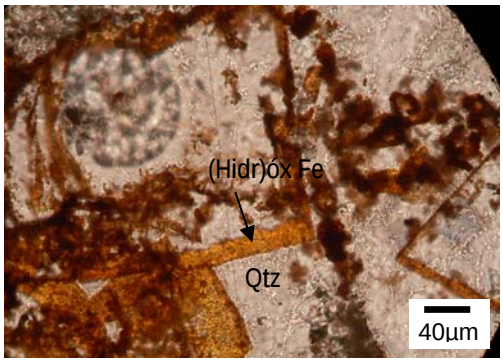


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: Lâmina seleccionada para litogeoquímica e análise de microssonda.

FICHA #65

Referência: BL-P-78

Coordenadas: 600329.8; 8656936.3

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspato (Fld), Quartzo (Qtz), carbonato (Cal?), piroxena (aegirina-augite (Ae-Au))

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e magnetite? (Mgt), pirite (Py) ou pirrotite (Po), hematite (Hem)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade média a grosseira e matriz silicatada, constituída por feldspato e quartzo.

A mineralogia dominante nesta rocha é caracterizada por agregados prismáticos grosseiros, subédricos a euédricos de um mineral verde com alto relevo, tintas de birrefrangência elevada (tintas azuis, verdes, rosa intenso de 2ª a 3ª ordem) (fig. 1 e 2), interpretado como possíveis piroxenas (aegirina-augite). Estes agregados distribuem-se de forma pervasiva ao longo da rocha e, em menor abundância, ao longo de uma rede de fracturas semi-paralelas.

Agregados incolores de cristais anédricos, com tintas de birrefrangência elevada (brancos de ordem superior), preenchem um veio, sendo caracterizados como carbonatos (calcite?) (fig, 3).

Magnetite, hematite e (hidr)óxidos de Fe associam-se à fase silicatada composta por piroxena (aegirina-augite); mineral creme, aparentemente isótropo incluso na magnetite (fig. 2 e 4) é interpretado como possível pirite (ou pirrotite?).

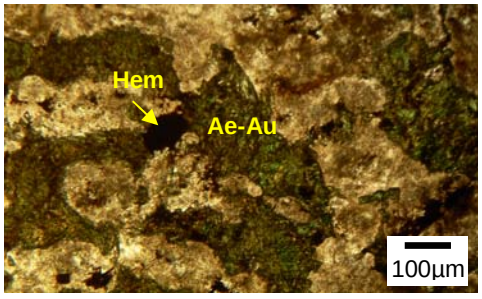


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

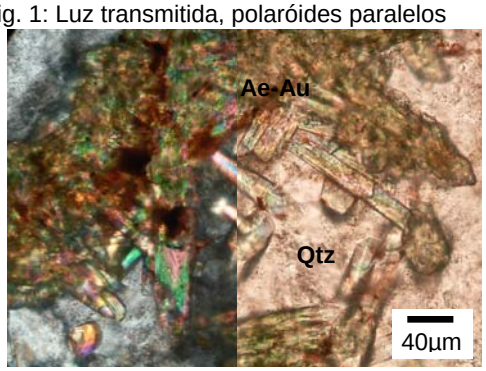


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides cruzados (à direita) e paralelos (à esquerda)

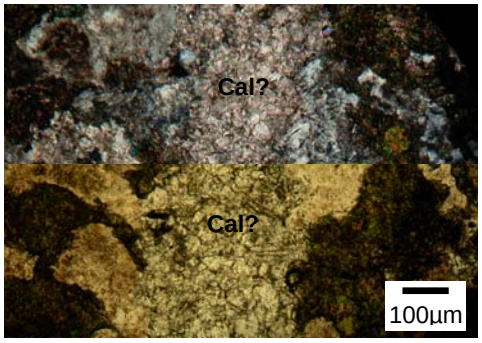


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides cruzados (em cima) e paralelos (em baixo)

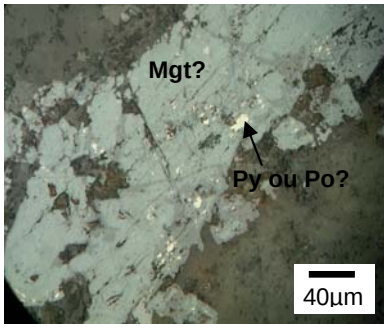


Fig. 4: Luz reflectida, polaróides paralelos

Observações complementares: Seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

FICHA #66

Referência: BL-P-79

Coordenadas: 600063.8; 8656684.1

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo (Qtz) e carbonatos

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe (Hematite/Goethite)

Classificação: Fenito

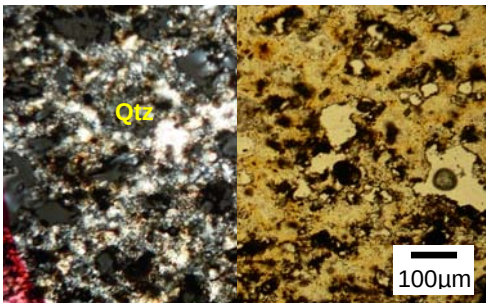


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados (à direita) e paralelos (à esquerda)

Descrição:

Fenito com granularidade fina e matriz silicatada essencialmente constituída por quartzo (fig. 1).

Minerais incolores com granularidade média em secções anédricas, duas direcções de clivagem perfeita, parecem corresponder a carbonatos e são os mesmos minerais observados nas lâminas das amostras BL-P-71, BL-P-75 e BL-P-76 (fig. 2).

Bolsadas de (hidr)óxidos de Fe, possivelmente substituindo óxidos pré-existentes, abundam em toda a rocha (fig. 3 e 4).

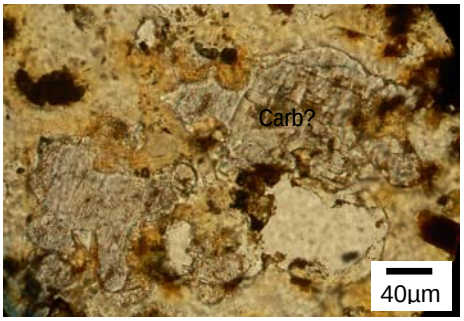


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

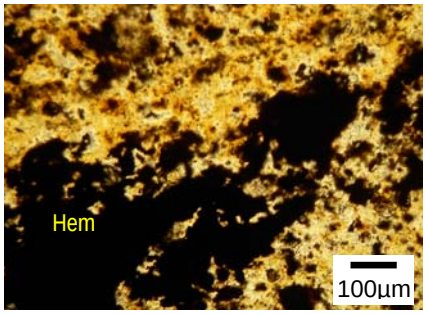


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

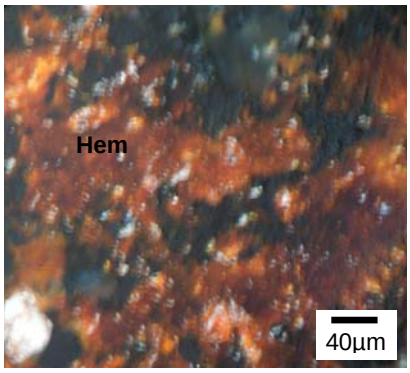


Fig. 4: Luz reflectida, polaróides

Observações complementares: Seleccionada para estudos de microssonda.

FICHA #67

Referência: BL-P-80

Coordenadas: 600080; 8656619

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe, magnetite (Mgt) e hematite (Hem)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade média e matriz silicatada constituída essencialmente por cristais anédricos de quartzo (fig. 1).

Associado à fase silicatada ocorrem abundantes agregados radiais de minerais castanho-amarelados de hábito alongado, também identificados na lâmina da amostra BL-P-64 que, sujeita a análise de microssonda, revelou tratarem-se de óxidos de Fe (figs. 1 e 2).

Magnetite a ser substituída por hematite, tal como na amostra BL-P-76, é aqui observada (fig. 3).

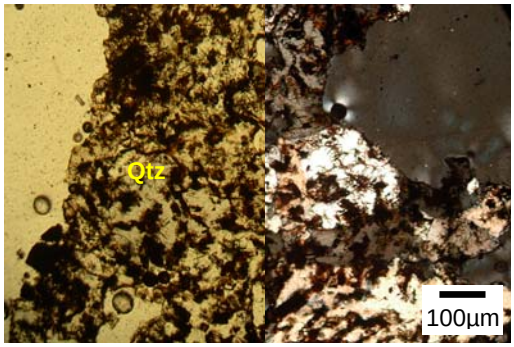


Fig. 1: lLuz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

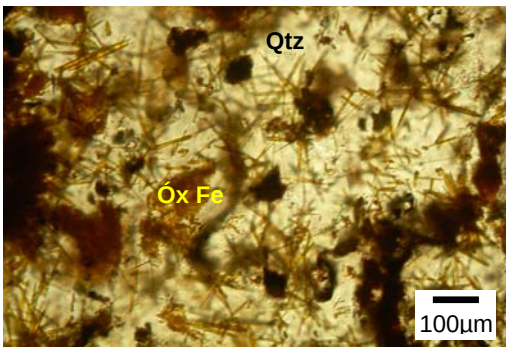


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

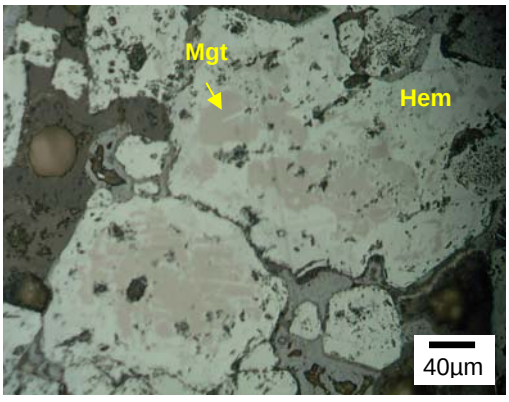


Fig. 3: Luz reflectida, polaróides paralelos

Observações complementares: Seleccionada para litogeoquímica e microssonda.

FICHA #68

Referência: BL-P-81 A

Coordenadas:

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Anidrite? (Anh)

Associação mineral acessória: Magnetite (Mgt)

Classificação: Minério de Fe

Descrição:

A matriz é constituída por cristais grosseiros de um mineral incolor, com tintas de birrefrangência de 2ª a 3ª ordem. Visto apresentar tintas de interferência altas, torna-se de difícil identificação, pois não são típicas dos carbonatos, nem dos feldspatos, feldspatóides e quartzo que apresentam tintas de 1ª ordem (cinzentos). Uma proposta de classificação aponta tratar-se de anidrite, sulfato de cálcio incolor e birrefrangência elevada (até verdes de 3ª ordem); no entanto, a anidrite apresenta clivagem distinta em três direcções independentes, mutuamente perpendiculares, que não é aqui observada (figs. 1 e 2).

Os agregados de (hdr)óxidos de Fe e magnetite perfazem cerca de 90% da rocha (figs. 1 e 2).

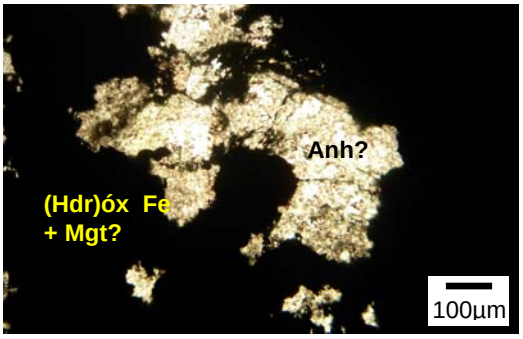


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

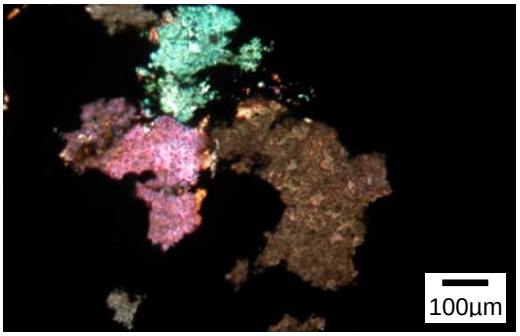


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides cruzados

Observações complementares: As coordenadas da amostra não foram fornecidas. Seleccionada para litogeoquímica e microssonda.

FICHA #69

Referência: BL-P-81 B

Coordenadas:

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo (Qtz),

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe e magnetite (Mgt)

Classificação: Minério de Fe

Descrição:

Fenito com granularidade média a grosseira e matriz silicatada constituída essencialmente por cristais anédricos de quartzo (fig. 1).

Abundantes (hidr)óxidos de Fe alterando/substituindo massas de magnetite (figs. 1 e 2).

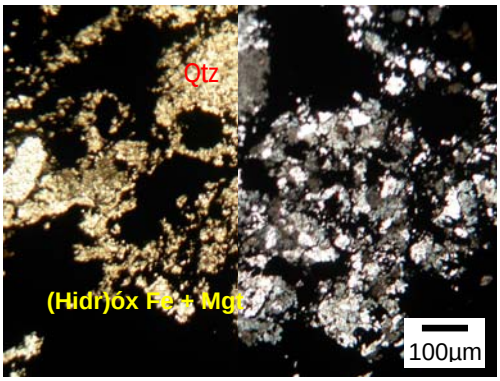


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

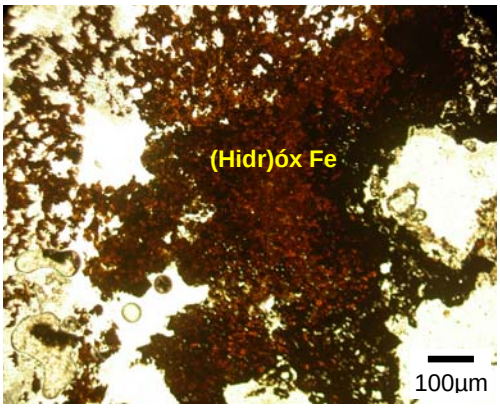


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: As coordenadas da amostra não foram fornecidas. Seleccionada para litogeoquímica.

FICHA #70

Referência: BL-P- 31

Coordenadas: 604361; 8657289

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonatos (calcite (Cal))

Associação mineral acessória: Pirocloro (Pc), apatite (Ap), (hidr)óxido de Fe (goethite (Gt) e/ou lepidococrocite (Lep)) e zeólito (Ze)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade grosseira de matriz carbonatada constituída por calcite (fig. 1).

Ocorrência de minerais euédricos, castanhos e isótropos, identificados como pirocloro (fig. 1).

Abundantes agregados de cristais prismáticos incolores, de relevo moderado e isótropos; são identificados como apatite (figs. 1, 2 e 3).

(Hdr)óxidos de Fe pouco abundantes; são classificados como possível lepidocrocite (fig. 3) e goethite (fig. 4).

Agregado fibroso radial, incolor e tintas de birrefrangência baixa (cinzentos de 1ª ordem) é interpretado como zeólito (fig. 4).

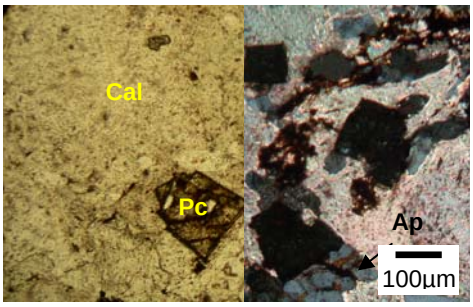


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

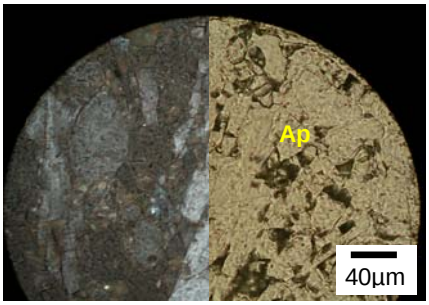


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos (à direita) e cruzados (à esquerda)

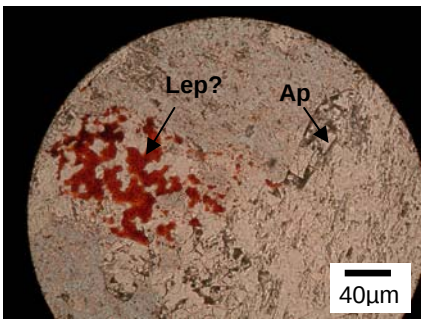


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

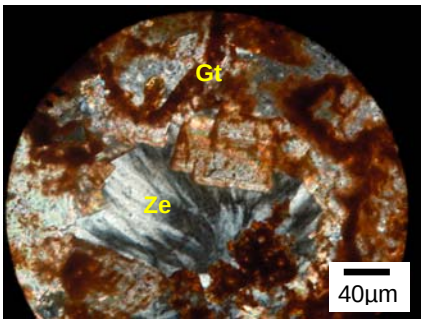


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides cruzados

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

FICHA #71

Referência: BL-P- 32

Coordenadas: 604368; 8657302

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: Pirocloro (Pc), apatite (Ap), (hidr)óxido de Fe e Mn (goethite (Gt)), hematite (Hem) e magnetite (Mgt)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade média e matriz silicatada constituída essencialmente por quartzo (que, frequentemente, exibe texturas radiadas; fig. 1).

Ocorrência de minerais euédricos, castanhos e isótropos são identificados como pirocloro (fig. 1 e 3). Na figura 2 observam-se vestígios de minerais (pirocloro?) com forma euédrica que parecem ter sido corroídos, uma vez que o seu interior está preenchido por matriz.

Abundantes agregados incolores de apatite em secções prismáticas e basais, de relevo moderado, isótropas continuam a ser comuns (fig. 3). Agregado mineral fibroso radial, esverdungado que pode corresponder a (hidr)óxidos de Fe-Mn (fig. 4). Os (hidr)óxidos de Fe comuns são classificados como goethite (fig. 4).

Identificam-se ainda algumas relíquias de magnetite e hematite.

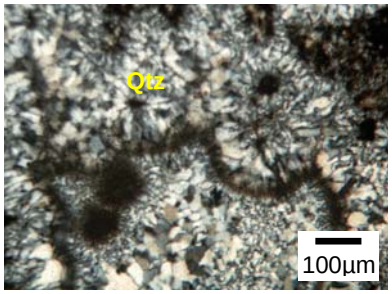


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

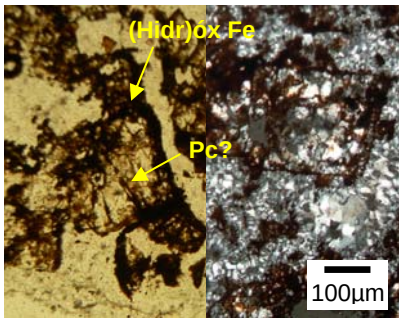


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

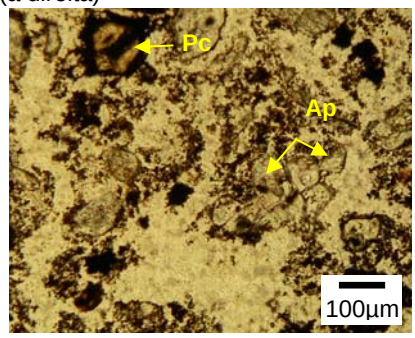


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

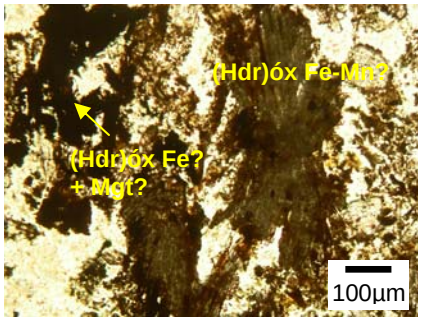


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para análise microssonda electrónica.

FICHA #72

Referência: BL-P- 33

Coordenadas: 604375; 8657462

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: Pirocloro (Pc), (hidr)óxido de Fe (goethite (Gt)) e magnetite (Mgt)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade média e matriz silicatada constituída essencialmente por quartzo (fig. 1 e 2).

Minerais euédricos, castanhos e quasi-isótropos são identificados como pirocloro (fig. 1).

Abundantes agregados de (hidr)óxidos de Fe (predominantemente goethite) e relíquias de magnetite ocorrem disseminados por toda a rocha (fig. 3).

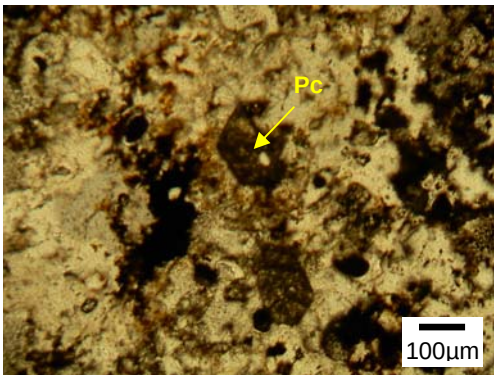


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

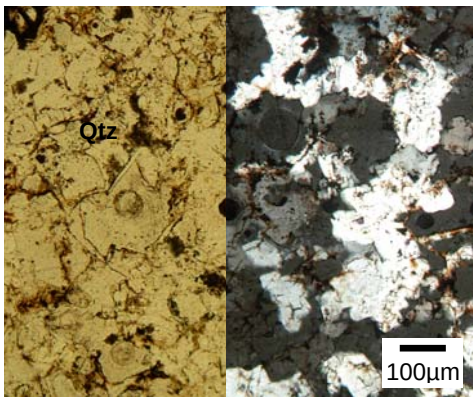


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

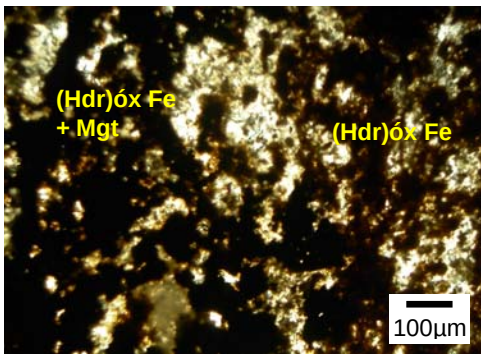


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica. A lâmina está muito espessa pelo que as tintas de interferência estão alteradas.

Ficha #73

Referência: BL-P- 51

Coordenadas: 604067; 8655669

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Carbonato (calcite)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe (Goethite (Gt)), hematite (Hem) e apatite (Ap)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade grosseira e matriz carbonatada essencialmente constituída por cristais anédricos de carbonato, cujas propriedades ópticas (incolores, tintas de birrefrangência elevadas, clivagem romboédrica com três direcções de clivagem, embora só muito raramente possa ser visualizada nas secções presentes) permitem classificar como provável calcite (fig. 1).

Regista-se a ocorrência de abundantes agregados de secções prismáticas e basais de cristais incolores, relevo moderado e isótropos, classificados como apatite (fig. 1); são muitas vezes encontrados nas fronteiras entre os grãos de carbonato (fig. 2).

(Hidr)óxidos de Fe (goethite) abundantes, ocorrendo dispersos pela matriz e ao longo das fronteiras entre os grãos de carbonato, por vezes, com apatite associada (fig. 2). Observam-se relíquias da hematite que, por processos de alteração, deram origem à goethite (fig. 3).

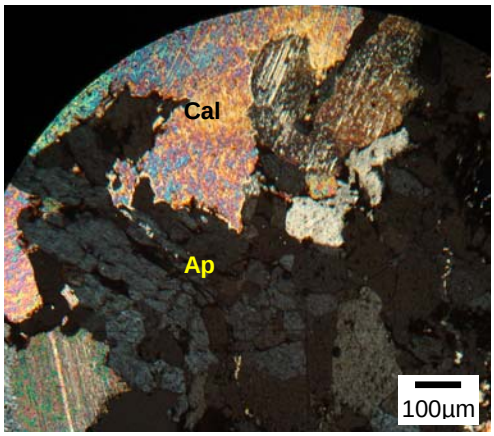


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides cruzados

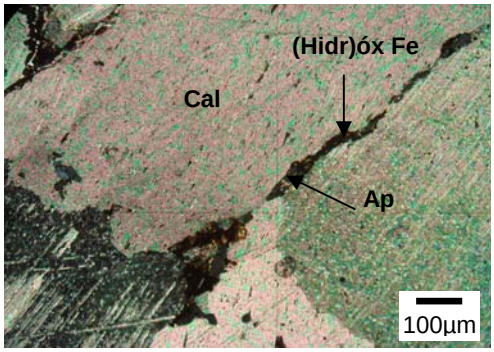


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides cruzados

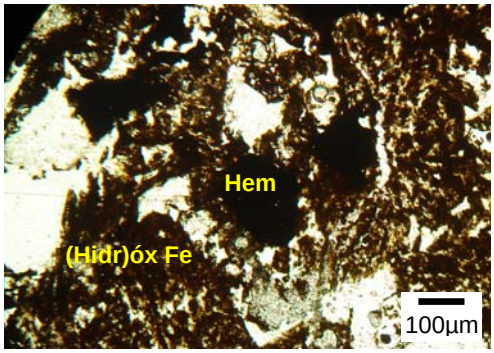


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: Exemplar seleccionado para estudos de litogeoquímica e microssonda.

FICHA #74

Referência: BL-P- 55

Coordenadas: 604669; 8655410

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld), quartzo (Qtz) e piroxenas (aegirina-augite (Ae-Au))

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe (Goethite (Gt)) e hematite (Hem)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade média a grosseira e matriz silicatada constituída maioritariamente por cristais anédricos de feldspato grosseiro e cristais anédricos de quartzo com granularidade média (fig. 1). Uma segunda geração de quartzo está presente na forma de filonetes que cortam a matriz silicatada (fig. 4).

Associados às fases silicificadas ocorrem minerais prismáticos alongados, incolores a verde pálido, com tintas de birrefrangência de 2ª ordem, que aparentam ser piroxenas (aegirina-augite) (figs. 2 e 3).

Abundantes (hidr)óxidos de Fe (goethite), castanho-amarelados, disseminados na matriz (fig. 2 e 3) e dispostos em redes anastomosadas de fracturas (fig. 1) são observados, assim como relíquias de hematite (fig. 3).

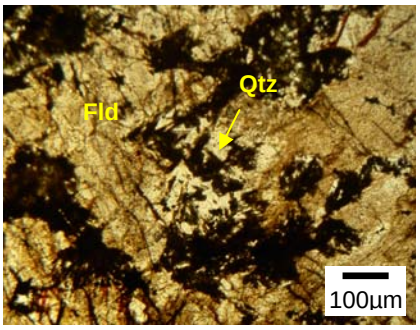


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

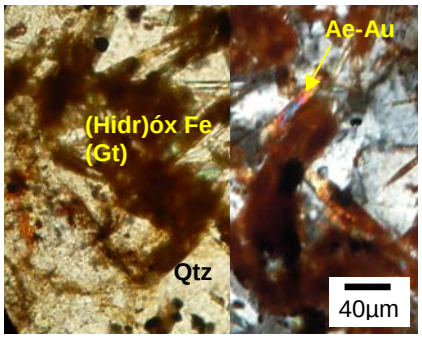


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

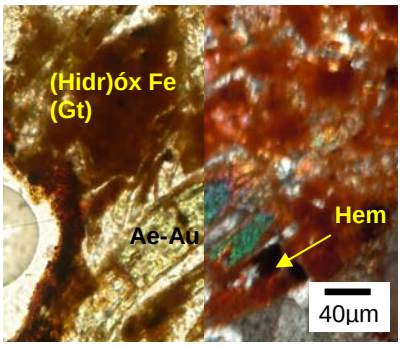


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

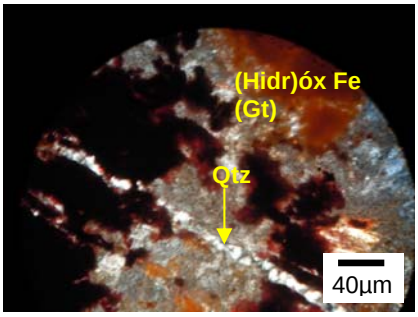


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides cruzados

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

FICHA #75

Referência: BL-P- 56

Coordenadas: 604883; 8655448

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld) e piroxenas (aegirina-augite (Ae-Au))

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe?

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito de granularidade grosseira e matriz silicatada constituída essencialmente por cristais anédricos de feldspato (fig. 1).

Característica a salientar nesta rocha é a presença de minerais amarelados dispostos ao longo dos bordos dos cristais de feldspato, que podem corresponder a (hidr)óxidos de Fe (fig. 1.

Minerais quasi-transparentes (verde pálido) prismáticos alongados, tintas de birrefrangência azuis de 2ª ordem e dimensão muito reduzida, aparecem associados à fase silicatada (fig. 2) e correspondem a piroxenas (aegirina-augite).

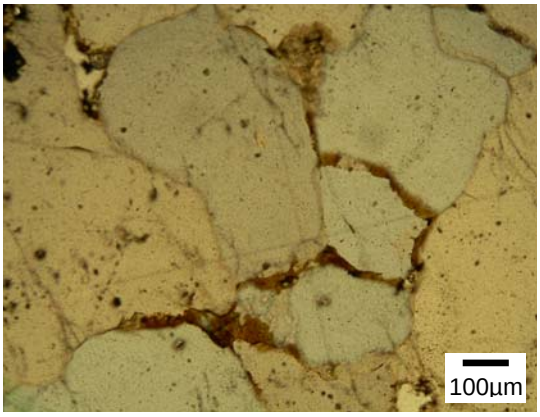


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

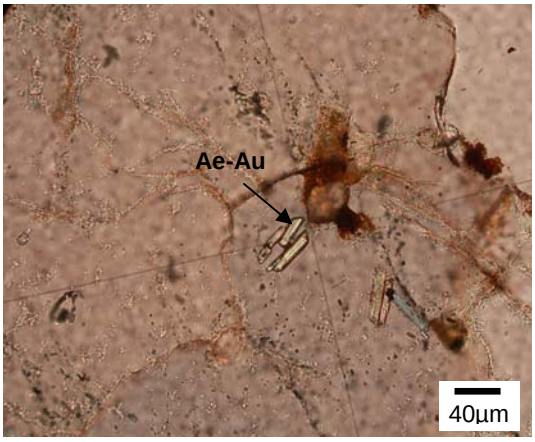


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para análise microssonda electrónica.

FICHA #76

Referência: BL-P- 57

Coordenadas: 605003; 8655113

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe, e Fosfatos (?)

Classificação: Fenito

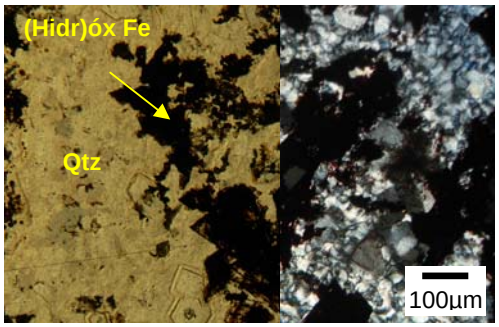


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

Descrição:

Fenito com granularidade fina a média e matriz silicatada constituída essencialmente por cristais de quartzo em secções pseudo-hexagonais, denunciando um crescimento em espaço aberto (fig. 1).

Agregado mineral acicular, esverdungado, associado ao quartzo; pode tratar-se de fosfatos (fig. 2); as características ópticas e granularidade muito fina do agregado não permitem a sua classificação fidedigna.

Abundante agregados de (hidr)óxidos de Fe (fig. 1).

Na figura 3 podemos observar vestígios de um mineral com forma losângica que parece ter sido corroído, uma vez que o seu interior está preenchido por matriz (fig. 3).

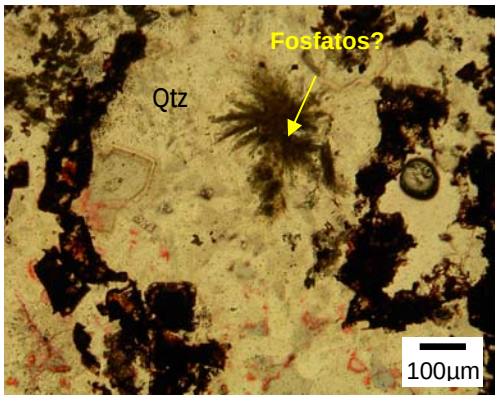


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

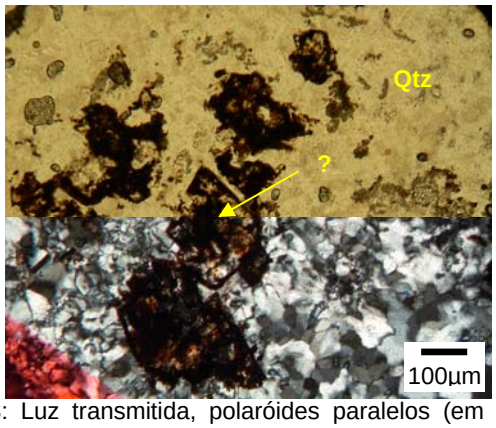


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos (em cima) e cruzados (em baixo)

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica.

FICHA #77

Referência: BL-P- 58

Coordenadas: 605217; 8654839

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld) e quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe (goethite (Gt), lepidocrocite? (Lep)), e Hematite

Classificação: Minério

Descrição:

Fenito com granularidade fina a grosseira e matriz silicatada constituída presumivelmente por feldspatos e quartzo; a matriz apresenta granularidade muito fina, tornando difícil a identificação das fases que a constituem (fig. 1).

Abundantes bolsadas de hidróxidos de Fe (goethite/lepidocrocite) e relíquias de hematite ocorrem na rocha. Minerais corados, amarelos, amarelo-alaranjados devem corresponder a lepidocrocite ou goethite (fig. 2); os minerais opacos são preponderantemente hematite a partir da qual, por alteração, ocorre a formação dos hidróxidos (figs. 2 e 3).

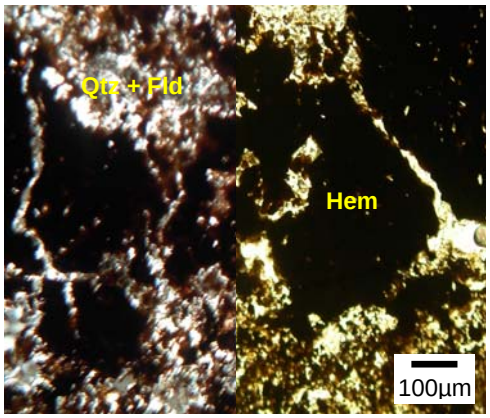


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos (à direita) e cruzados (à esquerda)

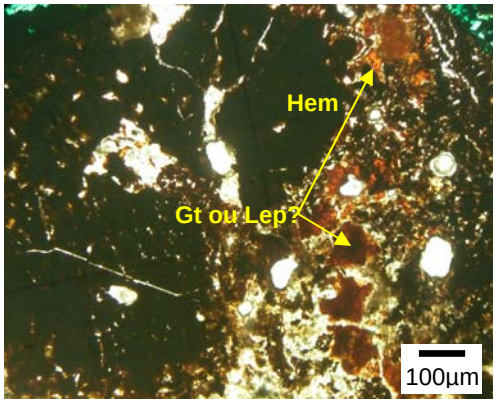


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

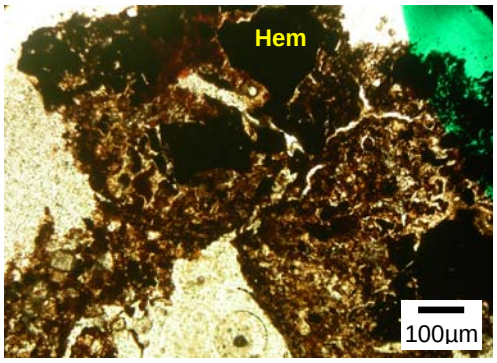


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

FICHA #78

Referência: BL-P- 59

Coordenadas: 605355; 8655022

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld) e quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: Hematite (Hem)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito de granularidade grosseira e matriz silicatada constituída essencialmente por feldspatos grosseiros e quartzo de granularidade fina (figs. 1 e 2).

Redes anastomosadas de hematite são abundantes (figs. 1 e 2).

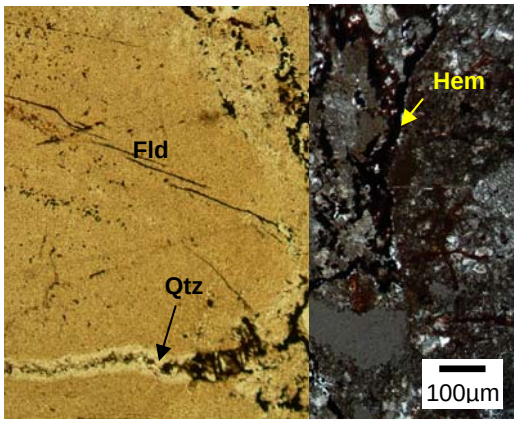


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos (à direita) e cruzados (à esquerda)

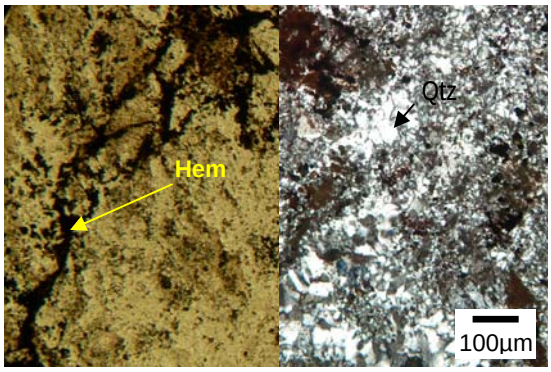


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita)

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica.

FICHA #79

Referência: BL-P- 60

Coordenadas: 605389; 8655132

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos (Fld) e quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe (goethite (Gt)/lepidocrocite (Lep)), magnetite (Mgt) e hematite (Hem)

Classificação: Minério

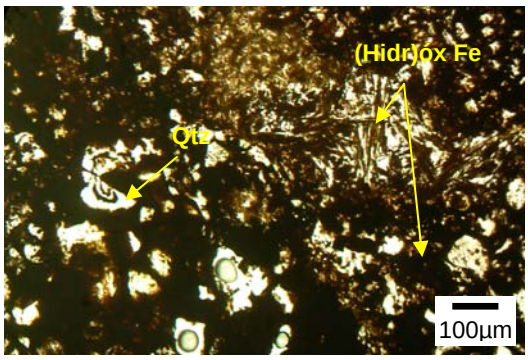


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos

Descrição:

Fenito com granularidade média e matriz silicatada constituída essencialmente por quartzo? (figs. 1 e 3).

Abundantes (hidr)óxidos de Fe distribuem-se pela rocha; minerais castanho-amarelados podem ser interpretados como goethite (fig. 2) e os amarelo-alaranjados como lepidocrocite (fig. 3).

Relíquias de magnetite que, por alteração, deram origem aos (hidr)óxidos presentes, são abundantes. Tal como na lâmina da amostra BL-P-76, é possível observar um mineral rosado, aparentemente sem reflexões internas, interpretado como magnetite hematitizada (fig. 3).

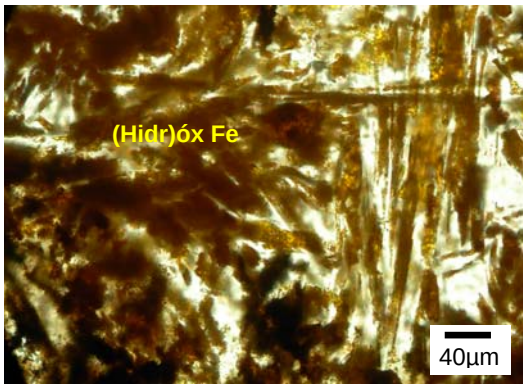


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

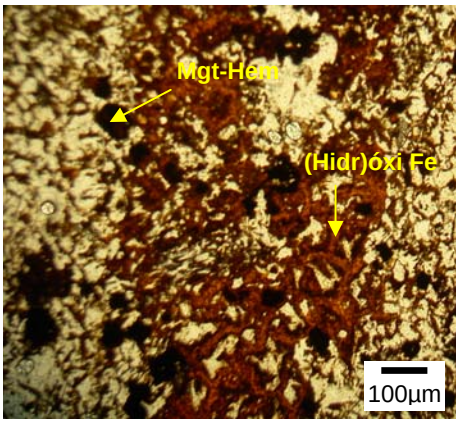


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares: seleccionada para litogeoquímica e análise microssonda electrónica.

FICHA #80

Referência: BL-P- 50

Coordenadas: 603919; 8655766

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: (Hidr)óxidos de Fe (Goethite (Gt)/lepidocrocite (Lep)), hematite (Hem) e silicatos (ainda não identificados)

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito com granularidade média a grosseira, cuja matriz silicatada é essencialmente constituída por cristais subédricos a anédricos de quartzo (fig. 1).

(Hidr)óxidos de Fe (goethite) relativamente abundantes (fig. 1). Observam-se relíquias da hematite que, por processos de alteração, deram origem à goethite (fig. 3). Minerais amarelos são identificados como (hidr)óxidos de ferro, possivelmente misturas de lepidocrocite + goethite (fig. 5).

Regista-se ainda a ocorrência de alguns agregados minerais quasi-transparentes, subédricos a anédricos, cujas características ópticas não permitem uma proposta de classificação fidedigna (fig. 2); parecem experimentar um processo de alteração, no qual são substituídos por (hidr)óxidos de ferro.

Ocorrem abundantes silicatos tardios, de hábito anédrico, também observados na lâmina correspondente à amostra BL-P-68, em associação com os agregados de quartzo; as características ópticas não permitem fazer uma proposta de classificação para esta fase mineral; verifica-se que muitas das microcavidades observadas na lâmina polida devem corresponder ao vazio deixado por estes silicatos aquando da sua meteorização.

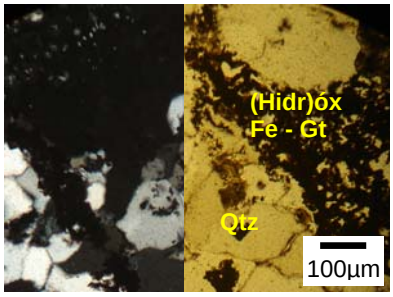


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos (à direita) e cruzados (à esquerda)

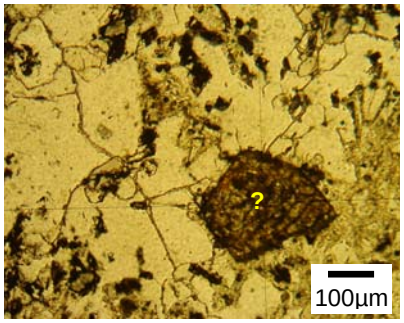


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos

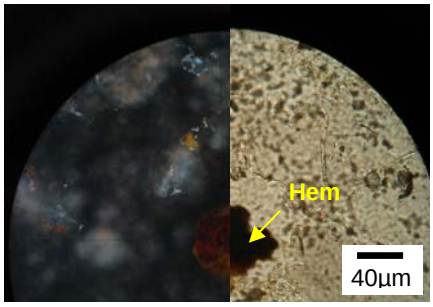


Fig. 3: Luz reflectida (à esquerda) e transmitida (à direita), polaróides paralelos

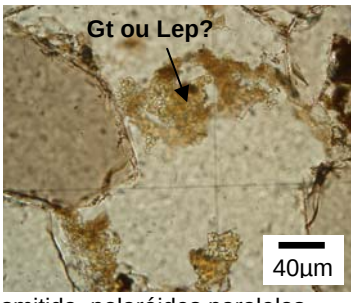


Fig. 4: Luz transmitida, polaróides paralelos

Observações complementares:

FICHA #81

Referência: BL-P- 64

Coordenadas: 600646; 8656002

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspato alcalino (Fld), quartzo (Qtz) e carbonato.

Associação mineral acessória: Óxidos de titânio (Anátase (Ant) e (hidr)óxidos de ferro

Classificação: Fenito

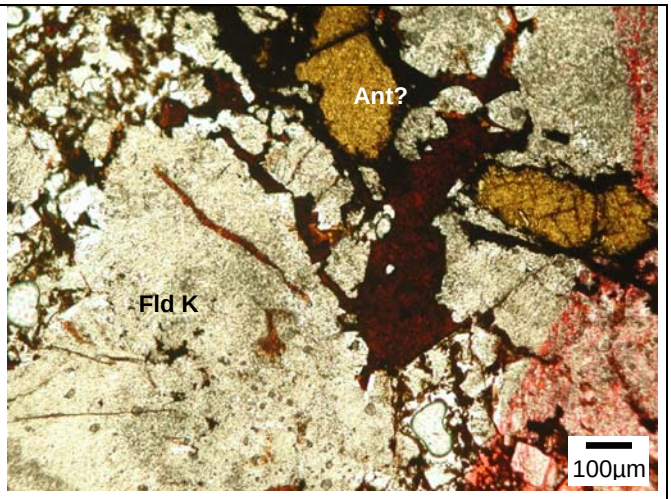


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos.

Descrição:

Fenito de granularidade grosseira, cuja matriz é essencialmente constituída por feldspatos alcalinos; os efeitos da silicificação são localmente intensos; pelo contrário, a carbonatação tardia é incipiente. Regista-se ainda fracturação de intensidade variável.

Em estreita associação com os domínios silicificados, desenvolvem-se numerosos agregados radiais de minerais castanho-amarelados de hábito alongado identificados como óxidos de ferro (Figs. 2 e 3). Co-existindo com os feldspatos alcalinos, destaca-se ainda um mineral castanho-amarelado de hábito anédrico, cuja composição (óxido de titânio) é compatível com a proposta de identificação óptica anátase (Fig. 1).

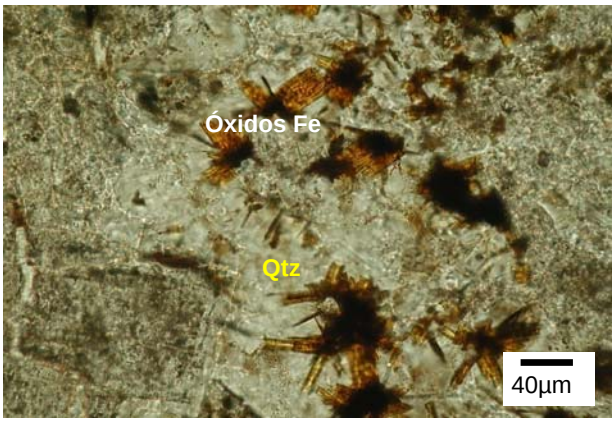


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos.

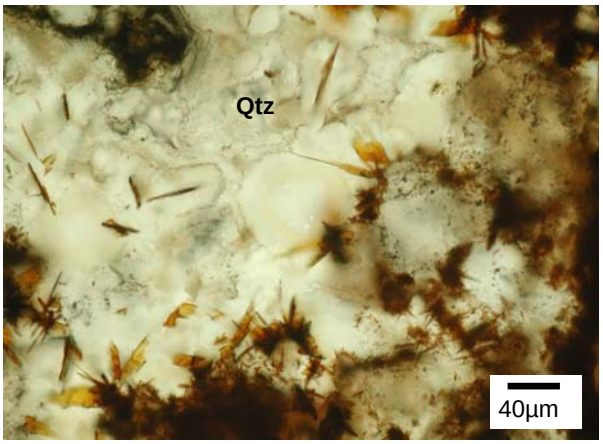


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos.

Observações complementares: Seleccionada para estudos de microssonda e litogeoquímica.

FICHA #82

Referência: BL-P- 68

Coordenadas: 600489; 8655971

Local: Bailundo

Associação mineral principal: Feldspatos alcalinos, piroxenas (aegirina-augite (Ae-Au)), carbonatos e quartzo (Qtz)

Associação mineral acessória: Silicatos (ainda não identificados) e óxidos de ferro

Classificação: Fenito

Descrição:

Fenito de granularidade grosseira cuja matriz é constituída por abundantes feldspatos alcalinos; a silicificação tardia é relativamente intensa; os carbonatos intersticiais e tardios, são raros.

Abundantes minerais de hábito prismático, pleocroísmo de incolor a esverdeado e tintas de birrefrangência elevada foram identificados como piroxenas (Figs. 1 e 2); estes associam-se preferencialmente aos agregados de quartzo (Figs. 1 e 5).

Regista-se ainda a presença de abundantes silicatos tardios (de hábito anédrico), geralmente coexistindo com os agregados de feldspato (Figs. 3 e 4); os escassos resultados de microssonda disponíveis ainda não permitem fazer uma proposta de classificação para esta fase mineral acessória.

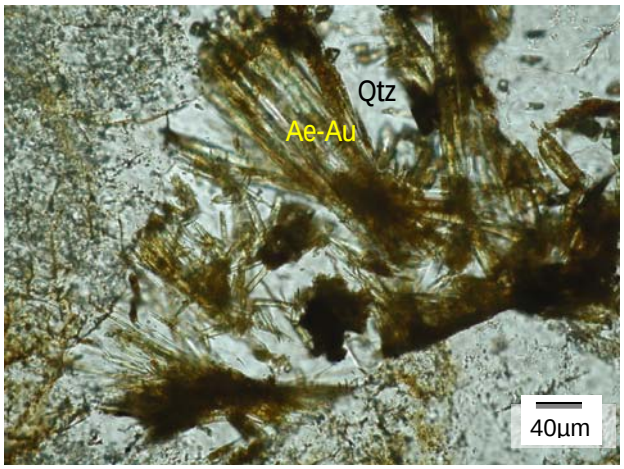


Fig. 1: Luz transmitida, polaróides paralelos.

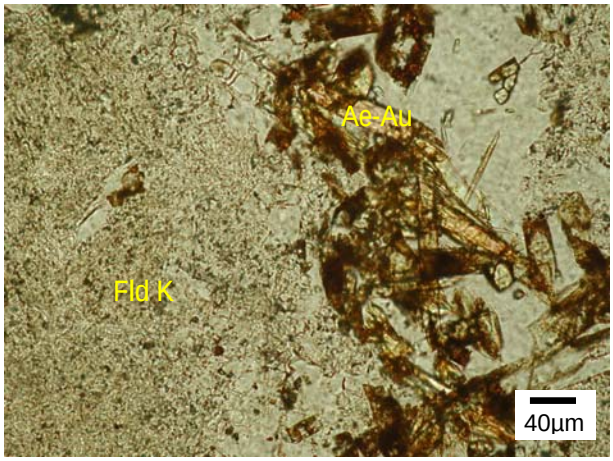


Fig. 2: Luz transmitida, polaróides paralelos.

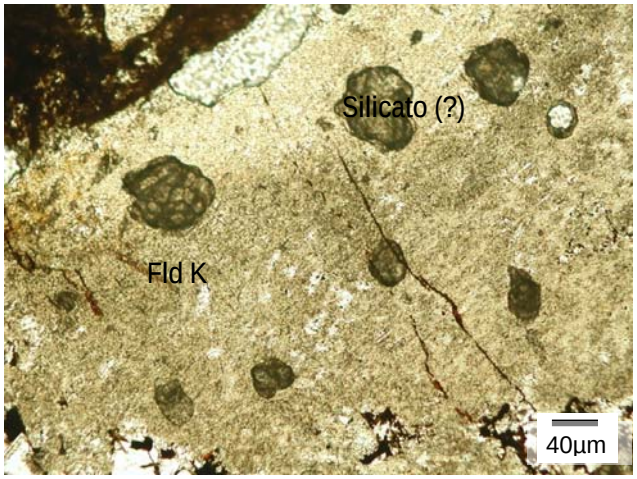


Fig. 3: Luz transmitida, polaróides paralelos.

Fig. 4: Luz transmitida, polaróides paralelos.

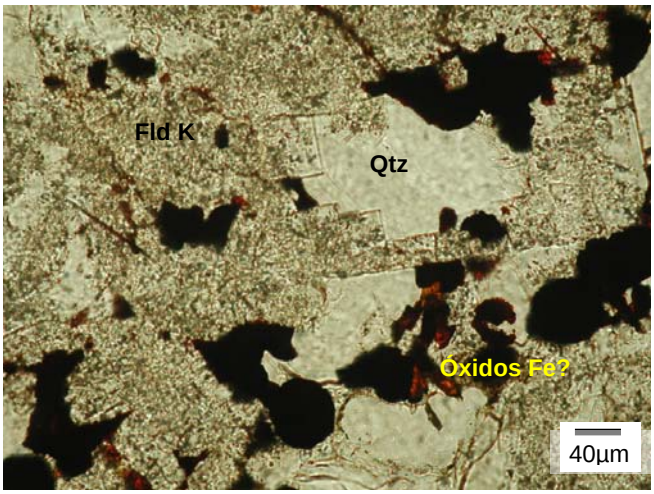


Fig. 5: Luz transmitida, polaróides paralelos.

Observações complementares: Seleccionada para estudos de microssonda.

ANEXO III

Tabela 1. Síntese dos resultados analíticos obtidos para as fases do grupo pirocloro.

Litótipo	*Cálcio-carbonatitos*							*Fenitos NE*							
Amostra	BL-P 39 (1)	BL-P 39 (6)	BL-P 39 (7)					BL-P 31 (1)		BL-P 31 (2)		BL-P 31 (5)			
Análise	1	1	1					7	18	1	2	2			
Subgrupo	*Pirocloro*							Pirocloro							
Espécie	*Pirocloro*		*Pb-Pirocloro*					Pirocloro							
				N	*Min*	*Máx*	*Med*						*N*	*Min*	*Máx*	*Med*
Nb_2O_5	70.124	70.601	60.735		43.560	72.433	70.104	64.934	63.490	69.245	69.790	65.449		62.017	72.525	64.952
TiO_2	3.116	3.039	2.875		1.515	3.821	3.039	4.969	4.097	3.893	2.768	4.097		2.377	5.359	3.998
ThO_2	0.134	0.166	0.021		0.000	0.372	0.126	0.564	2.060	2.121	2.151	1.964		0.564	2.668	1.868
Fe_2O_3	0.062	0.100	0.318		0.056	3.761	0.159	0.164	0.320	0.076	0.645	0.257		0.040	1.494	0.268
La_2O_3	0.138	0.115	0.036		0.004	0.234	0.127	0.047	0.128	0.139	0.109	0.054		0.010	0.233	0.110
Ce_2O_3	0.437	0.363	0.635		0.210	7.340	0.402	0.495	0.923	0.842	0.888	0.752		0.418	1.668	0.817
Pr_2O_3	0.037	0.067	0.000		0.000	0.094	0.033	0.048	0.042	0.072	0.047	0.041		0.000	0.146	0.042
Nd_2O_3	0.128	0.000	0.166		0.000	0.384	0.083	0.245	0.060	0.191	0.125	0.291		0.000	0.384	0.153
Sm_2O_3	0.000	0.000	0.000		0.000	0.084	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.000		0.000	0.098	0.007
MnO	0.000	0.000	0.024		0.000	0.024	0.000	0.017	0.080	0.000	0.000	0.018		0.000	0.080	0.000
CaO	16.496	17.241	10.227		0.637	18.144	17.241	17.608	17.646	16.341	15.129	17.988		12.480	18.566	17.207
SrO	1.480	1.539	2.211		0.377	2.906	1.071	0.278	0.485	0.380	1.220	0.160		0.160	5.284	0.287
PbO	1.927	1.261	22.046		0.178	50.686	0.879	0.250	0.136	0.235	0.284	0.156		0.104	0.369	0.215
Na_2O	0.116	0.080	0.049		0.000	0.552	0.092	6.712	6.448	0.129	0.028	7.275		0.000	8.101	6.083
F	1.949	1.881	0.971	***35***	0.000	2.356	1.696	3.750	3.717	2.024	1.147	4.170	***48***	1.092	4.715	3.734
Total	96.144	96.453	100.314		84.070	100.314	95.815	100.081	99.632	95.688	94.351	102.672		85.919	102.899	99.589
$O=F_2$	0.821	0.792	0.409		0.000	0.992	0.714	1.579	1.565	0.852	0.483	1.756		0.460	1.985	1.572
Total corrigido	95.324	95.661	99.905		83.952	99.905	95.059	98.502	98.067	94.835	93.868	100.916		85.243	101.064	97.766

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises; Min – mínimo; Máx – máximo; Med – mediana.

Tabela 1. (continuação)

Distribuição catiónica na base de B = 2

A								
Ca	1.037	1.078	0.734	1.136	1.181	1.021	0.950	1.173
Mn	0.000	0.000	0.001	0.001	0.004	0.000	0.000	0.001
Sr	0.050	0.052	0.086	0.010	0.018	0.013	0.041	0.006
Pb	0.030	0.020	0.398	0.004	0.002	0.004	0.004	0.003
Na	0.013	0.009	0.006	0.784	0.781	0.015	0.003	0.858
ETRL	0.016	0.012	0.020	0.018	0.026	0.026	0.025	0.025
Th	0.002	0.002	0.000	0.008	0.029	0.028	0.029	0.027
Sum A	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**1**	**1**	**2**
B								
Nb	1.860	1.862	1.839	1.767	1.792	1.826	1.849	1.801
Ti	0.138	0.133	0.145	0.225	0.192	0.171	0.122	0.188
Fe^{3+}	0.003	0.004	0.016	0.007	0.015	0.003	0.028	0.012
Sum B	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**
C								
F	0.362	0.347	0.206	0.714	0.734	0.373	0.213	0.803
Moles %								
Nb#	93.11	93.32	92.70	88.70	90.30	91.44	93.81	90.57
Ti#	6.89	6.68	7.30	11.30	9.70	8.56	6.19	9.43

Tabela 2. Síntese dos resultados analíticos obtidos para as fases do grupo pirocloro.

Litótipo	*Ferro-carbonatitos*						*Cálcio-carbonatitos*					
Amostra	**BL-P37 (1)**						**BL-P1 (1)**					
Análise	7	15					10	17				
Subgrupo	*Pirocloro*						*Pirocloro*					
Espécie	*Bario-pirocloro*						*Bario-pirocloro*					
			N	*Min*	*Máx*	*Med*			*N*	*Min*	*Máx*	*Med*
Nb_2O_5	67.63	65.62		60.09	68.76	67.57	70.36	69.61		66.57	72.08	69.57
SiO_2	0.05	0.40		0.04	2.01	0.18	1.18	1.21		0.66	1.35	1.23
TiO_2	5.67	5.37		4.93	6.14	5.60	4.05	4.01		2.77	4.14	4.00
ZrO_2	0.02	0.87		0.00	1.06	0.02	1.07	0.99		0.00	1.21	1.02
ThO_2	0.08	0.14		0.00	0.22	0.10	0.17	0.10		0.00	0.17	0.06
Fe_2O_3	0.14	0.73		0.09	1.69	0.27	0.61	0.82		0.46	1.04	0.60
La_2O_3	0.18	0.45		0.00	0.87	0.16	0.00	0.01		0.00	0.08	0.00
Ce_2O_3	1.84	2.62		0.99	2.82	1.30	0.99	0.88		0.62	1.96	0.94
Pr_2O_3	0.00	0.08		0.00	0.17	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
Nd_2O_3	0.03	0.22		0.00	0.38	0.10	0.13	0.06		0.00	0.22	0.07
Sm_2O_3	0.03	0.01		0.00	0.04	0.00	0.01	0.00		0.00	0.03	0.00
CaO	0.01	0.03		0.00	0.09	0.02	0.01	0.01		0.00	0.04	0.01
BaO	18.73	17.93		17.08	22.03	19.16	14.09	13.95		13.48	16.05	14.11
PbO	0.69	0.73		0.42	0.96	0.66	0.82	0.79		0.59	0.82	0.73
K_2O	0.00	0.01		0.00	0.02	0.00	0.16	0.19		0.15	0.24	0.19
Cl	0.00	0.01		0.00	0.03	0.00	0.00	0.00		0.00	0.03	0.00
F	0.00	0.10	***18***	0.00	0.16	0.01	0.03	0.05	***16***	0.00	0.17	0.02
Total	95.25	95.42		94.16	96.47	95.54	93.76	92.84		90.07	95.80	92.49
O=Cl	0.00	0.00		0.00	0.01	0.00	0.00	0.00		0.00	0.07	0.01
O= F_2	0.00	0.04		0.00	0.07	0.00	0.01	0.02		0.00	0.01	0.00
Total corrigido	95.25	95.37		94.13	96.46	95.54	93.75	92.82		90.05	95.73	92.43
H_2O máx	4.75	4.63		3.54	5.87	4.46	6.25	7.18		4.27	9.95	7.57

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises; Min – mínimo; Máx – máximo; Med – mediana.

Tabela 2. (continuação)

Distribuição catiónica na base de B = 2				
A				
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.42	0.41	0.30	0.30
Pb	0.01	0.01	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.01	0.01
Fe^{3+}	0.01	0.03	0.03	0.03
ETRL	0.04	0.07	0.02	0.02
Pr	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum A	**0.48**	**0.53**	**0.38**	**0.39**
B				
Nb	1.75	1.72	1.74	1.74
Ti	0.24	0.23	0.17	0.17
Zr	0.00	0.02	0.03	0.03
Si	0.00	0.02	0.06	0.07
Sum B	**2**	**2**	**2**	**2**
C				
F	0.00	0.02	0.01	0.01
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00
O	5.38	5.45	5.27	5.28
O assoc. H	0.86	0.80	0.91	0.90
Total aniões	6.24	6.26	6.19	6.19
Lacunas aniónicas	0.76	0.74	0.81	0.81
Total_H	1.71	1.59	1.83	1.81
Moles %				
Nb#	87.69	88.01	91.26	91.24
Ti#	12.23	11.99	8.74	8.76
Ta#	0.08	0.00	0.00	0.00

Tabela 3. Síntese dos resultados analíticos obtidos para a cerianite.

Litótipo	*Ferro-carbonatitos*		
Amostra	BL-P 26 (1)		
Análise	1	3	
			N
P_2O_5	5.367	6.853	
ThO_2	18.894	17.656	
Y_2O_3	0.27	0.252	
La_2O_3			
Ce_2O_3	56.852	55.825	
Pr_2O_3	0.03	0	
Nd_2O_3	0.758	0.817	
Sm_2O_3	1.186	1.174	
Eu_2O_3	0	0.025	
Gd_2O_3	5.923	5.388	
Dy_2O_3	0.339	0.394	
Yb_2O_3	0	0.05	
Lu_2O_3	0	0.117	
CaO	0.496	0.686	
BaO	0.137	0.114	
SrO	0.007	0	
SiO_2	0.337	0.307	
Al_2O_3	1.205	1.042	
TiO_2	0.472	0.45	
Fe_2O_3	4.855	3.89	
MgO	0	0.004	
MnO	0.623	0.589	
Na_2O	0.026	0.02	
K_2O	0.003	0.006	
PbO	0.35	0.303	
ZrO_2	0.092	0.139	
UO_2	0.296	0.355	
Nb_2O_5	0.504	0.65	
F	0.528	0.648	
Cl	0.122	0.158	
O=F	0.222	0.273	
O=Cl	0.028	0.036	
Total	99.67	97.91	
O=F, Cl	0.25	0.31	
Total corrigido	99.42	97.60	***2***

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises.

Tabela 3. (continuação)

Distribuição catiónica na base de A = 1		
A		
Th	0.120	0.117
Y	0.004	0.004
∑ ETR	0.659	0.675
Ca	0.015	0.021
Ba	0.001	0.001
Sr	0.000	0.000
Si	0.009	0.009
Al	0.040	0.036
Ti	0.010	0.010
Fe	0.113	0.095
Mg	0.000	0.000
Mn	0.015	0.015
Na	0.001	0.001
K	0.000	0.000
Pb	0.003	0.002
Zr	0.001	0.002
U	0.002	0.002
Nb	0.006	0.009
Sum A	**1**	**1**
O	1.794	1.900

Tabela 4. Síntese dos resultados analíticos obtidos para a apatite.

Litótipo	*Cálcio-carbonatitos*			*Fenitos NE*						*Fenitos SE*						
Amostra	BL-P 28 (4)			BL-P 31 (1)	BL-P 31 (2)	BL-P 31 (3)	BL-P 31 (5)	BL-P 32 (3)	BL-P 32 (5)	BL-P 51 (1)	BL-P 51 (5)	BL-P 51 (7)				
Análise	1	5		9	3	1	2	3	1	10	6	2				
			N										*N*	*Min*	*Máx*	*Med*
CaO	54.557	54.168		53.924	54.587	54.341	54.841	54.742	54.375	54.417	53.953	54.268		51.284	55.090	54.375
Na_2O	0.208	0.211		0.204	0.172	0.224	0.158	0.160	0.213	0.079	0.136	0.131		0.038	0.448	0.175
P_2O_5	40.446	40.020		41.578	41.984	41.936	42.333	42.056	41.687	41.931	41.780	41.839		38.457	42.687	41.693
SrO	0.265	0.292		0.466	0.457	0.445	0.655	0.377	0.397	0.365	0.404	0.371		0.219	0.866	0.399
FeO	0.015	0.042		0.029	0.000	0.014	0.008	0.007	0.052	0.008	0.000	0.000		0.000	2.640	0.022
MnO	0.000	0.063		0.031	0.049	0.070	0.010	0.000	0.029	0.006	0.034	0.039		0.000	0.087	0.015
La_2O_3	0.184	0.197		0.036	0.079	0.111	0.093	0.017	0.053	0.161	0.204	0.195		0.000	0.233	0.113
Ce_2O_3	0.467	0.336		0.13	0.184	0.168	0.295	0.285	0.221	0.398	0.53	0.539		0.06	0.589	0.2745
Nd_2O_3	0.191	0.149		0.092	0.093	0.108	0.196	0.096	0.142	0.239	0.255	0.19		0	0.305	0.125
F	2.765	2.395		3.527	3.23	3.248	4.809	3.724	3.342	2.688	1.907	2.069		1.534	4.809	2.885
Cl	0.021	0.015		0.004	0.023	0.009	0	0.007	0	0	0.001	0.01		0	0.032	0.005
O≡F	1.164	1.008		1.485	1.360	1.368	2.025	1.568	1.407	1.132	0.803	0.871		0.646	2.025	1.215
O≡Cl	0.005	0.003		0.001	0.005	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002		0.000	0.007	0.001
Total corrigido	97.95	96.88	***5***	98.53	99.49	99.30	101.37	99.90	99.10	99.16	98.40	98.78	***88***	91.70	101.37	98.80

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises; Min – mínimo; Máx – máximo; Med – mediana.

Tabela 4. (continuação)

Distribuição catiónica na base de 24 oxigénios; Normalização com base em 10 catiões

A											
Ca	9.852	9.845	9.862	9.870	9.847	9.847	9.885	9.854	9.887	9.849	9.858
Na	0.068	0.069	0.068	0.056	0.073	0.051	0.052	0.070	0.026	0.045	0.043
Sr	0.026	0.029	0.046	0.045	0.044	0.064	0.037	0.039	0.036	0.040	0.036
Fe^{2+}	0.002	0.006	0.004	0.000	0.002	0.001	0.001	0.007	0.001	0.000	0.000
Mn	0.000	0.009	0.004	0.007	0.010	0.001	0.000	0.004	0.001	0.005	0.006
La	0.011	0.012	0.002	0.005	0.007	0.006	0.001	0.003	0.010	0.013	0.012
Ce	0.029	0.021	0.008	0.011	0.010	0.018	0.018	0.014	0.025	0.033	0.033
Nd	0.011	0.009	0.006	0.006	0.007	0.012	0.006	0.009	0.014	0.016	0.012
T											
P	5.771	5.747	6.008	5.998	6.004	6.006	6.001	5.969	6.019	6.026	6.005
Sum A + T	**15.771**	**15.747**	**16.008**	**15.998**	**16.004**	**16.006**	**16.001**	**15.969**	**16.019**	**16.026**	**16.005**
X											
F	0.74	0.64	0.952	0.86	0.87	1.27	0.99	0.89	0.72	0.51	0.55
Cl	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
OH	1.26	1.36	1.047	1.13	1.13	0.73	1.01	1.11	1.28	1.49	1.44
Sum X	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**

Tabela 5. Síntese dos resultados analíticos obtidos para as fases do grupo da rabdofanite.

Litótipo	*Ferro-carbonatitos*								
Amostra		BL-P 43 (6)			BL-P 34 (1)				
Análise	1	8	13	7	21				
Mineral	Brockite	Rabdofanite-(Ce)		Rabdofanite-(Nd)					
						N	*Min*	*Máx*	*Med*
P_2O_5	20.772	26.327	25.937	27.321	28.157		11.777	28.67	25.0295
ThO_2	10.205	6.439	6.084	3.745	1.74		0.021	17.222	5.8815
Y_2O_3	1.596	1.309	1.307	1.988	2.492		0	3.636	1.308
La_2O_3	8.144	9.661	9.065	9.873	10.268		2.972	10.989	8.981
Ce_2O_3	19.48	22.838	22.958	8.854	9.095		3.598	24.138	13.446
Pr_2O_3	2.534	2.88	2.657	6.85	6.402		1.132	7.332	2.9375
Nd_2O_3	6.972	8.326	9.269	22.171	23.454		0.626	24.971	8.536
Sm_2O_3	1.213	2.377	2.382	3.044	3.282		0.717	3.884	2.2145
Eu_2O_3		0.628	0.919	0.354	0.794		0	1.471	0.6345
Gd_2O_3	1.474	2.821	3.097	2.64	2.784		0.057	3.268	2.056
Dy_2O_3	0.176	1.064	0.919	0	0.879		0	1.595	0.624
Yb_2O_3		0.237	0.036	0	0.301		0	0.495	0.021
Lu_2O_3		0.04	0	0	0.101		0	0.568	0.054
CaO	9.362	1.612	3.014	2.252	2.046		1.409	24.806	2.784
BaO	0.923	0.702	0.677	1.251	1.417		0.321	2.184	0.8165
SrO	2.725	4.924	4.313	0.295	0.283		0	4.924	2.516
SiO_2		0.06	0.084	0.013	0.27		0.00	1.27	0.22
Al_2O_3		0	0	0.152	0.146		0.00	1.17	0.11
TiO_2		0	0.105	0.07	0.062		0.00	28.16	0.10
Fe_2O_3	0.360	0.000	0.118	0.002	0.000		0.00	25.40	0.17
MgO		0.033	0.092	0.000	0.000		0.00	8.82	0.07
MnO		0.089	0.236	0.132	0.000		0.00	0.83	0.20
Na_2O		0.008	0.067	0.000	0.000		0.00	0.27	0.04
K_2O		0.024	0.020	0.026	0.021		0.00	0.10	0.02
PbO		0.089	0.054	0.385	0.093		0.00	0.67	0.08
ZrO_2		0.952	0.824	0.939	1.257		0.20	1.39	0.80
UO_2		0.092	0.122	0.371	0		0.00	0.50	0.10
Nb_2O_5		0.079	0	0.12	0		0.00	9.68	0.04
Ta_2O_5		0.055	0	0	0		0.00	0.89	0.00
PaO_2		0	0	0.2	0.099		0.00	0.28	0.00
F	0.843	0.967	1.178	0.443	0.761		0.00	1.34	0.78
Cl	0.068	0.086	0.049	0.087	0.079		0.01	0.20	0.09
H_2O	13.559	5.704	4.935	6.629	4.058	***50***	2.27	20.24	8.24
O=F	0.355	0.407	0.496	0.187	0.320		0.00	0.57	0.33
O=Cl	0.015	0.019	0.011	0.020	0.018		0.00	0.05	0.02
Total	86.85	94.72	95.58	93.58	96.28		80.27	100.24	92.20
O=F, Cl	0.37	0.43	0.51	0.21	0.34		0.01	0.58	0.35
Total corrigido	86.48	94.29	95.08	93.37	95.94		79.89	100.21	91.90

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises; Min – mínimo; Máx – máximo; Med – mediana.

Tabela 5. (continuação)

Distribuição catiónica na base de A = 1

A					
Th	0.078	0.056	0.050	0.033	0.015
Y	0.028	0.027	0.025	0.042	0.051
∑ ETR	0.485	0.703	0.668	0.760	0.788
Ca	0.335	0.066	0.117	0.095	0.084
Ba	0.012	0.011	0.010	0.019	0.021
Sr	0.053	0.109	0.090	0.007	0.006
Al	0	0	0	0.007	0.007
Ti	0	0	0.003	0.002	0.002
Fe	0.009	0.000	0.003	0.000	0.000
Mg	0	0.002	0.005	0.000	0
Mn	0	0.003	0.007	0.004	0
Na	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00
Pb	0	0.001	0.001	0.004	0.001
Zr	0	0.018	0.015	0.018	0.023
U	0	0.001	0.001	0.003	0
Nb	0	0.001	0	0.002	0
Ta	0	0.001	0	0	0
Pa	0	0	0	0.002	0.001
Sum A	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
B					
Si	0	0.002	0.003	0.001	0.010
P	0.588	0.854	0.793	0.909	0.913
Sum B	**0.588**	**0.857**	**0.797**	**0.909**	**0.924**

Tabela 6. Síntese dos resultados analíticos obtidos para os intercrescimentos entre fosfatos, (hidr)óxidos de Fe e carbonatos.

Litótipo	*Ferro-carbonatitos*					
Amostra	BL-P43(8)	BL-P43(8)				
Análise	5	15				
			N	*Min*	*Máx*	*Med*
CaO	6.857	4.718		0.12	30.56	12.83
FeO	21.025	1.222		0.33	38.13	9.94
TiO_2	2.493	4.832		0.28	22.46	4.83
P_2O_5	10.570	6.408		0.22	18.75	4.74
MnO	0.369	0.079		0.00	1.57	0.37
MgO	11.569	1.271		0.08	22.02	7.79
ThO_2	2.954	2.275		0.04	6.89	1.53
Ta_2O_5	0.000	0.170		0.00	0.93	0.00
Na_2O	0.039	0.031		0.00	0.13	0.08
La_2O_3	4.902	6.230		0.00	6.23	1.35
Ce_2O_3	9.047	13.021		0.05	45.88	3.81
Pr_2O_3	1.305	1.493		0.00	1.49	0.22
Nd_2O_3	4.107	9.008		0.24	9.73	1.64
Sm_2O_3	0.686	0.639		0.00	1.64	0.62
Eu_2O_3	0.021	0.545		0.00	0.78	0.10
Gd_2O_3	0.701	2.986		0.00	3.57	0.44
Dy_2O_3	0.683	0.346		0.00	1.93	0.52
Yb_2O_3	0.000	0.154		0.00	0.19	0.00
Lu_2O_3	0.000	0.183		0.00	0.42	0.05
PbO	0.084	0.070		0.00	0.17	0.05
BaO	0.435	0.452		0.00	0.57	0.17
SrO	2.079	2.842		0.09	2.84	1.61
Nb_2O_5	0.551	0.751		0.00	6.27	0.75
ZrO_2	0.280	0.146		0.00	0.60	0.17
Y_2O_3	0.254	1.851		0.00	1.85	0.12
SiO_2	0.600	0.206		0.06	2.11	0.55
K_2O	0.001	0.069		0.00	0.10	0.01
Al_2O_3	0.024	0.073		0.00	0.53	0.06
UO_2	0.000	0.203		0.00	0.21	0.02
F	0.315	1.055		0.00	1.54	0.60
Cl	0.069	0.096	***17***	0.01	0.19	0.07
Total	82.02	63.43		51.19	89.92	68.42
O=F	0.13	0.44		0.00	0.65	0.25
O=Cl	0.02	0.02		0.00	0.04	0.02
Total corrigido	81.87	62.96		50.94	89.78	68.08
H_2O máx	18.13	37.04		10.23	49.06	31.92
CO_2 máx	18.13	37.04		10.22	49.06	31.92

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises; Min – mínimo; Máx – máximo; Med – mediana.

Tabela 7. Síntese dos resultados analíticos obtidos para a parisite.

Litótipo	*Cálcio-carbonatitos*					
Amostra	BL-P27(2)	BL-P39(1)				
Análise	1	13				
			N	*Min*	*Máx*	*Med*
CaO	10.120	10.527		5.74	11.99	9.24
FeO	9.982	1.569		0.27	9.98	1.28
TiO_2	0.107	0.008		0.01	0.11	0.02
P_2O_5	0.094	0.146		0.06	0.19	0.09
MnO	0.034	0.076		0.00	0.08	0.03
ThO_2	1.445	1.833		0.94	1.94	1.71
Ta_2O_5	0.030	0.183		0.03	0.18	0.11
La_2O_3	11.818	12.715		8.44	12.94	11.40
Ce_2O_3	24.223	27.645		18.23	27.65	23.55
Pr_2O_3	3.183	4.369		1.93	4.37	3.25
Nd_2O_3	5.034	7.371		3.27	7.37	4.73
Sm_2O_3	0.683	1.413		0.56	1.41	0.74
Eu_2O_3	0.026	0.141		0.03	0.36	0.14
Gd_2O_3	0.074	1.032		0.07	1.03	0.57
Dy_2O_3	0.010			0.01	0.37	0.05
Yb_2O_3	0.045	0.206		0.05	0.21	0.05
PbO	0.123			0.02	0.12	0.03
BaO	0.129	0.068		0.04	0.20	0.13
SrO	1.668	0.841		0.57	1.74	1.27
Nb_2O_5	0.236	0.022		0.02	0.24	0.06
ZrO_2	0.032	0.036		0.03	0.04	0.04
Y_2O_3		0.695		0.70	0.73	0.71
SiO_2	1.441	0.099		0.03	1.44	0.12
K_2O	0.013	0.008		0.00	0.01	0.01
MgO	0.102			0.01	0.10	0.03
Al_2O_3	0.353	0.037		0.01	0.35	0.03
UO_2	0.081	0.049		0.01	0.08	0.05
F	7.476	7.273		3.17	7.96	7.01
Cl	0.024	0.092	***6***	0.02	0.60	0.14
O=F	3.15	3.06		1.34	3.35	2.95
O=Cl	0.01	0.02		0.01	0.13	0.03
Total	81.73	78.45		45.01	78.59	6.05
O=F,Cl	3.15	3.08		1.47	3.39	3.01
Total corrigido	78.58	75.37		43.54	75.43	72.22
CO_2 max	24.567	24.63		24.57	56.46	30.53
H_2O max		0.63		0.63	31.00	69.47

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises; Min – mínimo; Máx – máximo; Med – mediana.

Tabela 7. (continuação)

Distribuição catiónica na base de B = 2

A		
Ca	0.86	1.02
Ti	0.01	0.00
Mn	0.00	0.01
Pb	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00
Sr	0.08	0.04
K	0.00	0.00
Mg	0.01	0.00
Sum A	**0.96**	**1.07**
B		
Ta	0.00	0.00
Nb	0.01	0.00
La	0.34	0.42
Ce	0.70	0.91
Pr	0.09	0.14
Nd	0.14	0.24
Sm	0.02	0.04
Eu	0.00	0.00
Gd	0.00	0.03
Dy	0.00	0.00
Yb	0.00	0.01
Y	0.00	0.03
Zr	0.00	0.00
Th	0.03	0.04
U	0.00	0.00
Fe	0.66	0.12
Sum B	**2.00**	**2.00**
Parte aniónica		
F	1.87	2.08
Cl	0.00	0.01
C	2.65	3.03
Sum	**4.52**	**5.12**

Tabela 8. Síntese dos resultados analíticos obtidos para os intercrescimentos entre flúor-carbonatos de ETR.

Litótipo	*Cálcio-carbonatitos*					
Amostra	BL-P39 (1)					
Análise	4	5				
			N	*Min*	*Máx*	*Med*
CaO	10.227	9.238		9.24	27.09	11.28
FeO	0.330	0.301		0.22	0.61	0.33
TiO_2	0.018			0.02	4.13	0.05
P_2O_5	0.138	0.115		0.12	0.63	0.15
ThO_2	1.528	1.433		0.66	1.53	1.42
Na_2O		0.008		0.01	0.18	0.02
La_2O_3	11.745	10.908		4.46	11.75	10.40
Ce_2O_3	25.776	24.327		8.62	25.78	22.71
Pr_2O_3	4.196	3.824		1.38	4.20	3.50
Nd_2O_3	7.465	6.560		3.37	7.47	6.66
Sm_2O_3	1.209	1.104		0.49	1.25	1.11
Eu_2O_3	0.093	0.246		0.09	0.44	0.22
Gd_2O_3	0.836	0.324		0.32	1.00	0.79
Dy_2O_3	0.244			0.03	0.29	0.18
Yb_2O_3	0.060			0.02	0.19	0.06
PbO		0.005		0.00	0.06	0.01
BaO	0.011			0.00	0.09	0.01
SrO	0.682	0.705		0.12	0.71	0.55
Nb_2O_5	0.056	0.038		0.01	0.96	0.03
Y_2O_3	0.679	0.599		0.34	0.93	0.64
SiO_2	0.043	0.089		0.04	0.16	0.09
K_2O	0.013	0.020		0.00	0.02	0.01
MgO		0.022		0.01	0.05	0.02
Al_2O_3	0.004			0.00	0.04	0.03
UO_2	0.082	0.088		0.03	0.09	0.04
F	7.586	6.978		4.44	7.59	6.44
Cl	0.178	0.294	***8***	0.14	0.33	0.20
O=F	3.19	2.94		1.87	3.19	2.71
O=Cl	0.04	0.07		0.03	0.07	0.04
Total	56.73	52.58		53.44	73.20	67.92
O=F, Cl	3.23	3.00		1.92	3.23	2.75
Total corrigido	53.49	49.58		51.52	69.96	64.98
CO_2 máx	30.04	35.78		30.04	48.48	35.02
H_2O máx	6.04	11.78		6.04	24.48	11.03

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises; Min – mínimo; Máx – máximo; Med – mediana.

Tabela 9. Síntese dos resultados analíticos obtidos para os intercrescimentos entre flúor-carbonatos de ETR e (hidr)óxidos de Fe.

Litótipo	*Cálcio-carbonatitos*					
Amostra	BL-P27(2)					
Análise	3	4				
			N	*Min*	*Máx*	*Med*
CaO	6.849	7.705		6.85	18.43	9.59
FeO	16.297	16.165		1.02	17.00	8.70
TiO_2	0.161	0.031		0.00	0.16	0.03
P_2O_5	0.024	0.527		0.02	0.68	0.13
MnO	0.041	0.184		0.01	0.46	0.05
ThO_2	1.149	0.911		0.40	2.63	1.27
La_2O_3	9.971	8.167		6.27	16.10	10.93
Ce_2O_3	20.719	17.379		16.63	33.35	22.54
Pr_2O_3	2.411	2.433		2.29	4.63	3.27
Nd_2O_3	3.360	3.296		3.26	8.62	4.94
Sm_2O_3	0.638	0.575		0.58	1.46	0.90
Eu_2O_3	0.058	0.074		0.00	0.59	0.07
Gd_2O_3	0.550	0.264		0.12	0.96	0.53
PbO	0.094	0.065		0.00	0.14	0.06
BaO	0.049	0.458		0.01	0.46	0.08
SrO	1.216	1.170		0.28	2.34	1.22
Nb_2O_5	0.118	0.060		0.01	0.12	0.04
SiO_2	1.558	1.355		0.09	1.88	0.51
MgO	0.054	0.846		0.01	5.77	0.06
Al_2O_3	0.070	0.067		0.03	0.49	0.09
UO_2	0.050	0.011		0.01	0.11	0.05
F	6.056	4.237		3.48	8.95	6.48
Cl	0.057	0.066	***15***	0.03	0.32	0.06
O=F	2.55	1.78		1.46	3.77	2.73
O=Cl	0.01	0.01		0.01	0.07	0.01
Total	74.11	67.84		56.23	86.96	80.36
O=F, Cl	2.56	1.80		1.50	3.79	2.75
Total corrigido	71.55	66.05		54.12	83.53	77.63
CO_2 máx	31.01	35.75		16.47	45.88	25.10
H_2O máx	4.44	9.55		1.10	29.89	4.02

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises; Min – mínimo; Máx – máximo; Med – mediana.

Tabela 10. Síntese dos resultados analíticos obtidos para os intercrescimentos entre flúor-carbonatos de ETR e óxidos de Mn e Ba.

Litótipo	*Cálcio-carbonatitos*		
Amostra	BL-P53(2)		
Análise	4	5	
			N
CaO	4.631	12.202	
FeO	3.886	0.832	
TiO_2	0.868	0.266	
P_2O_5	0.041	0.241	
MnO	40.320	11.657	
ThO_2	0.196	0.668	
Ta_2O_5		0.092	
Na_2O	0.044		
La_2O_3	2.934	7.369	
Ce_2O_3	6.929	20.476	
Pr_2O_3	0.719	3.270	
Nd_2O_3	2.334	6.652	
Sm_2O_3	0.320	0.956	
Eu_2O_3	0.373	0.172	
Gd_2O_3		0.070	
Dy_2O_3	5.165		
Yb_2O_3	0.149		
BaO	9.460	1.354	
SrO	0.096	0.268	
Nb_2O_5	0.082	0.033	
ZrO_2	0.004	0.002	
SiO_2	3.281	12.558	
K_2O	0.001	0.013	
MgO	0.192	0.183	
Al_2O_3	0.040		
UO_2	0.018	0.072	
F	1.658	5.215	
Cl	0.030	0.050	***2***
O=F	0.70	2.20	
O=Cl	0.01	0.01	
Total	84.48	86.88	
O=F, Cl	0.70	2.21	
Total corrigido	83.77	84.67	
CO_2 máx	16.93	17.54	
H_2O máx	0.94	1.54	

% em Peso de Óxidos; N – número de análises.

Tabela 11. Síntese dos resultados analíticos obtidos para os intercrescimentos entre flúor-carbonatos de ETR e fases baríticas/whiteríticas.

Litótipo	*Cálcio-carbonatitos*	
Amostra	BL-P39 (1)	
Análise	14	
		N
CaO	0.060	
FeO	0.029	
TiO_2	1.128	
P_2O_5	0.006	
ThO_2	0.015	
Na_2O	0.098	
BaO	56.942	
SrO	0.034	
Ce_2O_3	3.372	
Eu_2O_3	0.091	
Lu_2O_3	0.122	
Nb_2O_5	0.015	
PaO_2	0.014	
SiO_2	0.015	
K_2O	0.005	
MgO	0.032	
Al_2O_3	0.367	
F	0.015	
Cl	0.003	***1***
O=F	0.01	
O=Cl	0.00	
Total	62.36	
O=F,Cl	0.007	
Total corrigido	62.36	
CO_2 ou SO_4 máx	37.64	
H_2O máx	13.65	

% em Peso de Óxidos; N – nº de análises.

ANEXO IV

Tabela 1. Síntese da análise dos elementos maiores (wt%) e menores (ppm) para amostras dos *ferro-carbonatitos*.

	Ferro-carbonatitos														
Amostra	9	11	14	15	20	23	26	35	36	37	44	45	46	47	48
Elementos maiores em wt%															
SiO_2	0.98	1.38	1.05	0.96	1.21	1.93	2.68	2.31	0.79	0.45	22.93	0.64	0.86	4.25	0.66
Al_2O_3	0.49	1.22	0.29	0.14	0.3	0.57	5	0.84	0.18	0.16	0.3	0.15	0.39	5.09	0.08
$Fe_2O_3^T$	66.92	39.64	78.88	75.96	79.35	59.91	58.95	63.71	25.68	80.65	11.99	25.85	70.6	58.63	4.02
MnO	3.346	2.775	0.209	0.186	0.335	6.348	3.285	2.514	1.793	0.195	0.4	0.785	1.434	1.398	0.774
MgO	0.08	0.26	0.03	0.04	0.08	0.37	0.39	0.31	9.96	0.1	6.97	3.14	0.02	0.18	0.5
CaO	0.03	0.08	0.08	0.02	0.02	0.1	0.21	0.06	16.34	0.03	14.95	30.81	0.03	0.12	49.27
Na_2O	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	< 0.01	0.03	< 0.01	0.02	0.07	0.35	0.01	0.03	0.1
K_2O	0.03	0.03	0.03	0.03	< 0.01	0.02	< 0.01	0.02	0.05	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.08
TiO_2	1.286	9.526	1.765	1.587	0.833	0.508	0.171	0.681	2.656	2.423	2.227	0.992	1.552	2.414	0.481
P_2O_5	0.41	0.7	0.86	0.32	0.18	0.66	3.9	0.58	0.02	0.04	0.84	13.68	0.25	2.99	1.94
LOI	5.35	9.13	4.79	4.88	5.07	13.49	14.47	11.38	28.73	2.19	21.57	16.91	4.43	13.97	38.15
Total	78.94	64.78	88	84.14	87.41	83.92	89.08	82.44	86.19	86.3	82.29	93.31	79.6	89.1	96.06
Elementos menores em ppm															
Ba	56260	107100	7248	8923	16830	61690	41400	65760	28000	12630	82400	17630	44260	67730	9165
Co	46	37	28	77	20	18	28	21	26	18	4	11	61	29	< 1
Cr	210	30	< 20	20	40	30	< 20	< 20	< 20	70	30	< 20	20	< 20	< 20
Cu	5	2	9	< 1	< 1	1	< 1	1	48	72	17	1	2	13	4
Ga	9	10	40	7	8	12	10	10	69	13	11	19	21	24	17
Ge	2.9	3.2	6.1	1.5	1.7	4.9	3	2.2	6.3	1.6	2.6	3.4	3.2	3.1	3.4
Hf	0.7	2.9	0.6	0.6	1.1	1.4	0.4	0.5	0.9	0.8	1.7	2.9	1.3	2.6	1.2
Nb	1821.01	7451.81	1342.17	2002.76	1401.58	326	342	531.274	2341.8	7766.38	1807.03	2275.39	1897.91	2334.81	729
Ni	14	6	< 1	3	23	6	9	7	11	17	3	2	7	8	2
Pb	969	947	293	192	1980	392	670	351	861	482	497	420	1670	552	296
Rb	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1	9	4
S	780	1870	1100	1080	1190	960	340	1460	1530	870	370	1020	1080	910	1380
Sc	37	95	31	12	9	17	24	29	78	13	109	146	68	64	43

Tabela 1. (continuação)

Sr	86	1391	58	71	81	815	1159	480	26000	29	2805	5849	153	888	2379
Ta	< 0.01	0.63	< 0.01	< 0.01	0.11	< 0.01	< 0.01	0.08	< 0.01	2.82	0.17	< 0.01	0.03	1.04	0.36
Th	428	1840	454	112	81	1620	718	759	776	58	437	769	405	987	208
U	5.15	3.29	1.33	0.32	4.06	1.92	1.97	3.37	0.53	1.54	0.72	0.83	3.15	3.26	10.8
Y	142	841	216	68.8	25.7	270	181	149	367	40	462	1140	160	335	371
Zn	2370	4630	3720	3360	3170	934	2190	1540	2250	1320	1730	1130	2560	3230	886
Zr	18	53	19	22	29	81	12	34	24	44	48	154	46	78	38
La	828	1810	3950	962	271	186	417	249	8460	142	690	871	183	527	1730
Ce	2170	1900	4410	883	475	733	718	580	8410	258	1130	1760	726	970	3170
Pr	327	328	429	163	62.9	201	130	92.9	593	26.5	122	214	87.2	115	339
Nd	1170	1200	1310	467	175	920	622	447	1430	69	427	733	269	558	1010
Sm	145	384	142	73.3	17	206	173	106	141	12.1	114	144	45.3	195	182
Eu	37.2	159	34.6	17.3	3.48	46.4	47	25.2	44.7	3.91	51.6	45.7	12	75.2	50.6
Gd	89.1	466	100	35.2	8.28	99.4	110	51.1	130	10.5	166	140	31.2	187	134
Tb	11.6	57.6	8.84	3.59	0.93	12.2	10.8	6.1	18.4	1.9	26.8	27.2	5.34	22.1	17.9
Dy	49.3	223	39	17.7	4.97	60.6	40.7	28.8	78.6	9.57	115	173	29.7	87.2	85
Ho	6.75	30.4	6.72	2.97	0.83	9.37	5.75	4.63	11.8	1.46	17	36.6	5.02	12.4	14.2
Er	15.4	58.5	17.4	8.46	2.08	22.1	13.4	10.5	26.3	3.38	31.6	104	12.4	25.4	34.9
Tm	1.62	5.86	1.71	1.15	0.268	2.42	1.44	1.3	3.18	0.433	3.37	16.3	1.67	2.98	4.48
Yb	9.09	29.1	8.55	7.42	1.58	13	8.56	7.05	16.1	2.68	19.7	110	10.2	16.7	25.3
Lu	1.06	3.16	1.09	0.9	0.194	1.45	1.07	0.791	1.8	0.309	2.25	15.8	1.32	1.94	3.19
Σ ETR	4861.12	6654.62	10458.91	2642.99	1023.51	2512.94	2298.72	1610.37	19364.88	541.74	2916.32	4390.6	1419.35	2795.92	6800.57
F	< 0.01	0.03	< 0.01	0.01	< 0.01	0.06	0.03	0.03	0.19	0.01	0.19	1.38	0.03	0.21	0.38
CO_2	0.38	0.7	0.65	0.21	0.16	0.49	0.62	0.46	27.4	0.16	20.9	14	0.45	0.52	38.8

Tabela 2. Síntese da análise dos elementos maiores (wt%) e menores (ppm) para amostras dos *cálcio-carbonatitos*.

	Cálcio-carbonatitos													
Amostra	2	5	6	7	16	18	19	27	28	29	30	39	49	54
Elementos maiores em wt%														
SiO_2	85.11	81.76	85.56	28.89	0.52	0.72	1.59	3.87	2.74	8.24	4.69	2.3	92.83	69.09
Al_2O_3	0.11	0.18	0.12	0.4	0.03	0.13	0.19	0.18	0.12	0.03	0.11	0.33	0.15	7.56
$Fe_2O_3^T$	7.25	9.72	8.16	23.91	14.92	59.47	22.61	10.28	3.28	9.16	2.16	9.43	5.08	8.04
MnO	1.221	0.76	1.513	0.388	1.43	2.206	1.845	1.656	0.347	1.077	0.372	0.847	0.27	0.151
MgO	0.05	0.07	0.06	1.73	13.48	0.79	6.76	12.97	0.22	9.62	0.53	0.19	0.04	0.4
CaO	0.7	0.19	0.1	18.96	25.43	11.94	29	23.85	51.89	31.76	50.27	45.22	0.14	2.77
Na_2O	0.03	0.01	0.02	0.07	0.05	< 0.01	0.06	0.03	0.14	0.08	0.04	0.07	0.02	0.58
K_2O	0.01	0.02	0.02	0.09	< 0.01	< 0.01	0.06	0.02	0.04	0.01	0.04	0.21	0.02	4.48
TiO_2	0.139	0.083	0.156	1.258	0.108	0.265	0.505	0.084	0.118	0.34	0.063	0.561	0.093	0.502
P_2O_5	1.06	0.85	0.4	1.8	0.1	0.04	0.05	0.53	11.77	2.57	2.11	0.7	0.4	0.29
LOI	1.6	2.27	1.64	17.89	39.15	15.39	34	35.76	26.02	33.91	37.98	35.8	1.22	4.69
Total	97.28	95.93	97.76	95.39	95.22	90.96	96.68	89.23	96.68	96.81	98.37	95.66	100.2	98.55
Elementos menores em ppm														
Ba	3882	9080	4235	11320	6977	18140	9469	35720	8553	5805	5369	17890	263	1469
Co	9	3	15	19	8	15	16	1	< 1	< 1	< 1	8	3	4
Cr	< 20	< 20	< 20	30	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu	4	5	2	30	8	4	7	2	7	4	2	9	10	12
Ga	37	42	29	7	17	7	7	17	5	6	4	21	12	18
Ge	7.6	7.8	6.1	1.5	2.8	1.2	0.9	2.1	0.9	1.6	0.7	2.7	4	2.6
Hf	2.1	0.7	0.7	1.7	0.3	0.9	5.3	0.7	2.8	2.3	1.6	1.7	0.6	5.7
Nb	461.369	768.949	892	2747.24	394.96	312	736	130	128	3309.97	576.712	2257.91	388	699
Ni	3	2	12	5	2	4	3	5	1	2	2	4	< 1	4
Pb	163	120	569	144	842	54	51	757	28	227	49	891	147	15
Rb	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	14	< 1	7	< 1	< 1	2	< 1	83
S	220	1370	40	2410	1760	850	1900	1370	1750	750	660	910	60	340
Sc	15	18	16	17	68	14	20	48	31	15	7	57	12	13
Sr	532	292	355	1774	2753	346	1531	8284	4787	2998	2512	2014	75	405

Tabela 2. (continuação).

Ta	< 0.01	< 0.01	0.07	9.73	< 0.01	< 0.01	0.76	< 0.01	1.94	0.33	18.8	0.33	1.38	1.54
Th	654	943	447	129	124	75.1	132	395	65.6	410	46.5	236	56	20.2
U	8.01	8.57	7.5	15.9	3.4	1.32	2.32	2.45	5.26	4.46	33.5	9.36	2	2.43
Y	315	204	217	135	148	35.4	84.7	168	98.9	184	87	335	146	25.3
Zn	292	319	582	406	2450	1570	1070	1670	206	468	66	1570	219	68
Zr	156	46	20	127	15	29	218	32	200	255	139	125	18	235
La	2200	2610	2160	692	1440	538	339	4200	321	484	325	1320	591	262
Ce	4440	4780	3960	1170	2660	867	662	6530	670	1070	593	2430	1110	434
Pr	510	504	425	119	270	88.7	77.4	521	77.5	131	66.1	260	132	45.7
Nd	1930	1580	1520	346	674	228	235	1110	216	450	199	774	494	119
Sm	311	296	223	59.4	81.4	33.8	39.5	108	38.1	87.2	36.3	139	75.1	20.1
Eu	84.9	76.6	61.3	17.1	17.7	8.81	10.2	25.4	10.6	25.1	10.1	41.9	20.5	5.09
Gd	197	167	142	45.3	37.3	20.5	26.1	67	28.9	67.7	27.4	119	50.2	11.5
Tb	23.4	15.8	17.2	6.16	5	2.12	3.34	7.31	3.85	9.81	3.88	16.6	6.86	1.4
Dy	94.4	59.3	66.9	30.5	29.1	9.07	16.8	36.6	19.3	46.6	19.5	79.7	33.7	6.6
Ho	12.8	7.87	8.77	5.27	5.05	1.32	3.06	6.09	3.54	7.36	3.39	13.1	5.77	1.02
Er	23.7	19.9	18.3	13.6	13.4	3.06	8.2	16.9	9.7	16.3	8.12	30.4	14.8	2.42
Tm	2.28	1.94	1.85	1.8	1.61	0.396	1.18	2.07	1.52	1.97	1.14	3.85	1.78	0.251
Yb	8.32	11.7	7.43	10.8	9.58	2.39	6.57	11.9	9.99	10.5	6.39	21.1	11.2	1.52
Lu	0.997	1.56	0.877	1.42	1.31	0.331	0.848	1.51	1.48	1.29	0.827	2.69	1.44	0.208
Σ ETR	9838.797	10131.67	8612.627	2518.35	5245.45	1803.497	1429.198	12643.78	1411.48	2408.83	1300.147	5251.34	2548.35	910.809
F	0.03	0.02	0.01	0.23	0.13	0.03	0.02	0.38	1.55	0.41	0.23	0.22	< 0.01	0.12
CO_2	0.08	0.1	0.15	15.6	39.6	10.9	32.5	36.4	25.4	34.3	38.4	35.7	0.29	2.4

Tabela 3. Síntese da análise dos elementos maiores (wt%) e menores (ppm) para amostras dos *fenitos* – domínios *NE* e SE.

	Fenitos NE		*Fenitos SE*					
Amostra	31	33	51	55	57	58	59	60
Elementos maiores em wt%								
SiO_2	2.04	85.74	3.05	59.28	92.13	26.62	64.11	52.79
Al_2O_3	0.11	0.57	0.2	11.24	0.36	0.25	11.56	0.3
$Fe_2O_3^T$	4.04	8.26	16.9	14.08	3.27	59.04	11.21	38.16
MnO	0.211	0.797	0.198	0.386	0.274	1.946	0.205	1.929
MgO	0.24	0.06	0.19	0.13	0.03	0.25	0.02	0.16
CaO	50.59	0.14	44.11	0.13	0.08	0.06	0.05	0.02
Na_2O	0.07	0.02	0.04	0.64	0.02	0.01	0.16	< 0.01
K_2O	0.04	0.06	0.03	8.24	0.04	0.01	7.9	< 0.01
TiO_2	0.074	0.277	0.311	1.087	0.025	0.005	0.937	0.018
P_2O_5	2.64	0.49	4.37	0.26	0.57	0.47	0.13	0.32
LOI	38.18	2.89	30.19	2.79	1.08	8.88	2.69	5.36
Total	98.24	99.31	99.59	98.26	97.89	97.55	98.97	99.08
Elementos menores em ppm								
Ba	412	2272	396	616	1610	3108	598	3673
Co	8	3	30	15	32	19	14	18
Cr	< 20	20	< 20	< 20	< 20	40	70	200
Cu	2	37	2	4	2	1	4	2
Ga	5	16	8	30	14	12	24	13
Ge	0.6	4	1.2	2.1	7.4	4.2	3.8	3
Hf	4.6	1.2	1.2	10.3	2.7	0.4	9	0.5
Nb	271	489.331	707	190	250	16.5	234	78.8
Ni	< 1	17	2	6	5	14	9	74
Pb	< 3	78	21	25	17	537	39	140
Rb	11	4	2	108	4	< 1	92	< 1
S	80	20	130	100		40	50	80
Sc	< 1	27	2	24	4	2	15	7
Sr	2044	158	3078	165	231	59	137	143
Ta	0.9	0.9	47.2	0.88	0.41	< 0.01	0.61	0.08
Th	108	172	151	27.2	20.1	305	86	394
U	3.22	6.25	36.7	2.46	6.13	13.3	4.95	4.24
Y	64.4	233	76.3	20.6	516	153	25.2	39.6
Zn	26	175	59	189	25	1100	34	654
Zr	418	49	174	493	104	6	363	22
La	224	1320	274	185	1660	809	191	450
Ce	452	2440	615	344	2430	2040	525	2860
Pr	49.1	283	72.4	28.6	331	296	39.3	227
Nd	173	1050	236	93.6	1320	1150	144	868
Sm	27.4	162	44.2	14.2	202	153	24.8	131
Eu	7.07	45.1	12	3.76	55.8	36.6	6.22	28.4
Gd	19.9	115	29	9.49	160	87.9	15	57.4
Tb	2.68	13.6	3.68	1.14	19	9.24	1.66	4.85
Dy	13.5	60.8	17.7	5.26	88.7	39.6	7	15.7

Tabela 3. (continuação)

Ho	2.46	9.63	2.95	0.86	16.1	5.95	1.08	2.18
Er	6.66	23.6	7.21	2.28	40.1	14.3	2.71	5.76
Tm	1.01	2.88	0.834	0.38	4.98	1.31	0.397	0.584
Yb	5.63	16.1	4.52	2.63	26.4	5.83	2.22	2.94
Lu	0.738	2.01	0.521	0.467	3.77	0.602	0.317	0.416
Σ ETR	985.148	5543.72	1320.015	691.667	6357.85	4649.332	960.704	4654.23
F	0.32	< 0.01	0.23	< 0.01	0.04	< 0.01	0.02	0.01
CO_2	37.8	0.82	29.7	0.09	0.03	0.12	0.21	0.38

Tabela 4. Síntese da análise dos elementos maiores (wt%) e menores (ppm) para amostras dos *fenitos NW*.

	Fenitos NW												
Amostra	61	64	66	70	71	72	73	75	76	77	78	80	81
Elementos maiores em wt%													
SiO_2	66.03	63.13	66.43	62.7	2.12	91.03	72.49	1.31	0.56	90.12	55.1	21.45	1.39
Al_2O_3	12.87	13.1	13.73	10.68	0.95	0.09	10.52	0.1	0.04	0.72	8.52	0.18	0.04
$Fe_2O_3^T$	6.02	7.75	4.06	13.3	47.83	5.08	4.76	23.4	21.34	4.39	14.65	66.97	39.79
MnO	0.015	0.023	0.036	0.039	2.157	0.124	0.108	2.797	3.302	0.075	0.342	1.868	22.33
MgO	0.05	0.03	0.03	0.02	0.06	0.05	0.02	8.67	9.72	0.03	1.16	0.06	0.21
CaO	0.06	0.04	0.04	0.03	0.12	0.06	0.03	22.01	24.39	0.12	3.43	0.02	0.07
Na_2O	0.16	0.28	0.22	0.15	< 0.01	< 0.01	0.25	< 0.01	0.02	0.02	5	0.02	< 0.01
K_2O	11.35	10.36	11.34	7.69	< 0.01	0.02	8.9	< 0.01	0.02	0.02	7.38	0.02	< 0.01
TiO_2	0.781	1.224	0.64	1.214	0.144	0.03	0.464	0.203	0.14	0.025	0.799	0.144	0.061
P_2O_5	0.08	0.15	0.09	0.29	0.9	0.49	0.14	0.03	0.38	1.24	0.19	0.13	0.32
LOI	1.51	2.51	1.42	1.88	9.64	1.23	1.23	33.36	34.32	1.41	2.94	3.16	11.33
Total	98.9	98.6	98.03	98	63.92	98.21	98.92	91.89	94.24	98.17	99.52	94.02	75.55
Elementos menores em ppm													
Ba	564	476	487	2488	163600	2771	1099	25280	7604	7380	4219	41220	95220
Co	17	8	12	17	13	34	13	8	5	36	12	17	15
Cr	80	100	30	< 20	70	30	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	30	40
Cu	18	7	< 1	2	3	6	6	1	< 1	3	8	< 1	3
Ga	32	32	25	31	21	24	21	16	6	34	19	3	12
Ge	1.8	1.8	1.4	4.1	6.6	6	2.2	2.5	1.2	10.3	2.9	3.1	4.2
Hf	5.8	7.6	7.3	8.1	1.3	0.5	8.6	0.4	0.4	0.7	11.9	0.6	1.1
Nb	129	433	265	384.474	158	503.312	510	238	122	212	1342.17	273	94.1
Ni	19	24	9	5	37	4	7	6	5	8	8	7	28
Pb	27	18	11	90	84	46	61	57	179	35	82	308	1980
Rb	110	105	131	191	< 1	< 1	155	< 1	< 1	< 1	76	4	< 1
S	130	900	60	60	1660	620	80	1320	2240	800	770	1030	610
Sc	13	14	8	10	7	4	9	13	16	7	30	4	10
Sr	51	174	105	88	362	217	97	2554	5294	470	592	229	319
Ta	1.26	3.77	1.34	2	0.41	0.41	10.1	0.07	< 0.01	0.2	47.1	0.12	< 0.01

Tabela 4. (continuação)

Th	29.1	154	72.7	156	2350	61.2	189	237	164	129	237	47.2	894
U	0.86	1.75	1.06	1.66	7.89	9.04	14.5	32.3	5.29	3.42	63.7	6.02	7.54
Y	17.9	10.8	13.1	35.1	427	113	46.9	64.7	106	271	36.8	39.9	122
Zn	34	55	43	202	793	73	156	1880	1300	116	130	601	1300
Zr	191	209	250	301	20	33	312	18	10	16	491	31	85
La	141	378	214	219	493	1720	279	1310	359	2820	225	242	127
Ce	195	646	355	299	1940	3150	589	2210	824	4690	430	559	719
Pr	22.2	77.1	40	36.2	330	383	48.9	216	98.7	579	51.7	53.8	185
Nd	73.8	223	134	132	1560	1430	165	607	367	2250	198	183	834
Sm	11.8	34.9	19.8	26.9	337	210	31.7	76.5	53.2	324	43.5	37.2	153
Eu	3.01	8.21	4.62	7.49	89.2	51.7	8.57	19	14.5	78.9	12.1	10.3	27.9
Gd	8.53	18.5	11	19.2	218	108	24.3	42.6	34.3	172	30.6	23.3	47.7
Tb	1.07	1.65	1.15	2.28	28.7	11.6	3.07	4.83	5.12	18.1	3.23	2.83	4.19
Dy	4.81	5.17	4.44	9.96	120	46.4	13.9	20.2	26.1	72.7	11.7	12.1	22
Ho	0.75	0.63	0.58	1.53	16.5	5.66	2.11	2.56	4.52	10.6	1.57	1.83	3.9
Er	1.67	1.42	1.46	3.33	34.1	12.5	4.63	5.79	10.9	25.8	3.59	4.38	11.6
Tm	0.191	0.127	0.192	0.375	3.11	1.18	0.534	0.574	1.34	1.99	0.422	0.552	1.51
Yb	0.92	0.57	0.9	1.65	15.6	4.22	2.4	2.81	7.07	4.96	2.51	2.84	7.78
Lu	0.123	0.09	0.116	0.207	1.61	0.348	0.275	0.389	0.927	0.534	0.379	0.34	0.89
Σ ETR	464.874	1395.367	787.258	759.122	5186.82	7134.608	1173.389	4518.253	1806.677	11048.58	1014.301	1133.472	2145.47
F	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.12	0.11	0.11	0.07	< 0.01	0.01
CO_2	0.12	0.11	0.1	0.06	0.28	0.17	0.22	32.5	34.6	0.02	2.46	0.15	0.45

Tabela 5. Valores de normalização relativamente ao condrito (*in* Palme & Jones, 2003).

La	0.245
Ce	0.638
Pr	0.0964
Nd	0.474
Sm	0.154
Eu	0.058
Gd	0.204
Tb	0.0375
Dy	0.254
Ho	0.0567
Er	0.166
Tm	0.0256
Yb	0.165
Lu	0.0254

Tabela 6. Valores de normalização relativamente ao manto primitivo (*in* Palme & O'Neill, 2003).

Rb	0.605
Ba	6.75
Th	0.0834
U	0.0218
K	260
Nb	0.588
Ta	0.04
La	0.686
Ce	1.786
Sr	20.3
Nd	1.327
P	86
Sm	0.431
Zr	10.81
Hf	0.3
Eu	0.162
Ti	1280
Tb	0.105
Y	4.37
Yb	0.462
Lu	0.0711