



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**O DEPÓSITO DE FOSFATO COQUEIROS, COMPLEXO ALCALINO-
CARBONATÍTICO CATALÃO II: SIGNIFICÂNCIA DOS PROCESSOS
MAGMÁTICOS NA CONCENTRAÇÃO DE APATITA**

Brunno Abilio Ciriaco

Dissertação de mestrado
Nº 521

Brasília
2023



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**O DEPÓSITO DE FOSFATO COQUEIROS, COMPLEXO ALCALINO-
CARBONATÍTICO CATALÃO II: SIGNIFICÂNCIA DOS PROCESSOS
MAGMÁTICOS NA CONCENTRAÇÃO DE APATITA**

Brunno Abilio Ciriaco

Área de Concentração:

Geologia Econômica e Prospecção

Orientador:

Prof. Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira (IG/UnB)

Coorientador:

Prof. Dr. Pedro Filipe de Oliveira Cordeiro (PUC-Chile)

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Rogério Guitarrari Azzone (IGc/USP)

Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho (IG/UnB)

FICHA CATALOGRÁFICA

Ciriaco, Brunno Abilio

O Depósito de Fosfato Coqueiros, Complexo Alcalino-Carbonatítico Catalão II: Significância dos Processos Magmáticos na Concentração de Apatita. / Brunno Abilio Ciriaco; orientador Claudinei Gouveia de Oliveira; co-orientador Pedro Filipe de Oliveira Cordeiro. - Brasília, 2023.
226 p.

Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, 2023.

1. Bebedouritos. 2. Carbonatitos. 3. Depósitos Ígneos de Fosfato. I. Oliveira, Claudinei Gouveia, orient. II. Cordeiro, Pedro Filipe de Oliveira, co-orient. III. Título.

*He's lookin' for that home, and I hope he finds it
But, I'd trade all of my tomorrows, for one single yesterday
To be holdin' Bobby's body next to mine
(Janis Joplin)*

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço ao meu orientador Prof. Claudinei Gouveia pela força e apoio ao longo desses anos. Ao meu corientador Prof. Pedro Cordeiro pelas longas discussões e por todos os ensinamentos ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Ao Prof. Ítalo de Oliveira que desde a graduação tem me apoiado, primeiramente com os kimberlitos, e agora no desenvolvimento da minha dissertação com os bebedouritos e carbonatitos. Ao Matheus Palmieri pela disponibilização das amostras que deram base ao trabalho.

A toda a equipe de geologia da CMOC Brasil. Aos gestores Reginaldo Rugolo, Bruno Milanezi e Sérgio Silva por todo o apoio. Aos mestres Juliana Missiaggia e Tiago Karniol pelo aprendizado nesses últimos anos de convivência. Aos geólogos Tiara Cerva-Alves, Luiz Gustavo Costa, Maira Santos e Ana Carolina Rosa pelo apoio e discussões. Ao Luis Carlos de Assis por todas as conversas sobre todo a história da mineração em Catalão. A toda a equipe do galpão de geologia, Anderson Rezende, Vanderval Borges, Sebastião Junior, Paulo Freitas, Rodrigo Pereira, Vitor Ferreira, Jean Machado, Yuri Honorato, Yuri Ciriaco e Rodrigo Cardoso.

Aos professores Nilson Botelho e Federico Cuadros pela ajuda com a petrografia e química mineral. A toda equipe do Laboratório de Microsonda Eletrônica da UnB, Iris Dias e Carlos França. Aos meus companheiros de microsonda, Pedro Alves e Isabela Souza. Ao CRTI-UFG e a equipe da microsonda. Aos meus queridos colegas de pós-graduação, Maria Masella, Beatriz Dantas e Ana Luiza Machado. Ao Felipe Ruiz e Elisa Barbosa pelas conversas e discussões. Obrigado as grandes mulheres da minha vida pelo suporte incondicional, Maria Antonieta Araujo, Valma Ciriaco e Dianezia Ciriaco.

RESUMO

O complexo alcalino-carbonatítico Catalão II está situado na porção setentrional da Província Ígnea Alto Paranaíba, próximo à cidade homônima de Catalão (Goiás, Brasil). O complexo é formado por bebedouritos, foscoritos e carbonatitos, com álcali-feldspato sienito e lamprófiros ultramáficos subordinados. Sistemas magmáticos distintos entre as porções sul e norte são reconhecidos com base em diferenças no modo de intrusão e nos tipos de rochas predominantes. Catalão II Sul é composto predominantemente por diques e veios de foscoritos tardios e calcita a dolomita carbonatitos. Catalão II Norte é formado por bebedouritos, apatitito, calcita carbonatitos e diques tardios que compreendem foscoritos, calcita a dolomita carbonatitos e álcali-feldspato sienito. Lamprófiros ultramáficos ocorrem em toda a área como último pulso intrusivo. Rochas ricas em apatita abrigam importantes recursos de fosfato na porção norte. A área conhecida como o depósito Coqueiros contém recursos de fosfato estimados na ordem de 45 Mt a 11,0% de P_2O_5 para apatita residual no perfil de intemperismo e 410 Mt a 9,0% de P_2O_5 em rocha fresca. As principais litologias portadoras de apatita são bebedouritos e apatititos. Foscoritos apresentam uma distribuição volumétrica limitada. Com base em descrições de testemunhos de sondagem, caracterização petrográfica, composição mineral e de rocha total, pelo menos três estágios intrusivos de bebedouritos podem ser reconhecidos, dois deles associados a um respectivo carbonatito. O primeiro estágio intrusivo é formado pelo tetraferrihogopita bebedourito na porção externa da intrusão. O segundo estágio é composto pelo apatita bebedourito, tetraferrihogopita apatitito e diopsídio calcita carbonatito como *stocks* e *plugs*. O terceiro estágio é formado pelo titanita bebedourito e aegirina-augita calcita carbonatito intrusivos sobre demais rochas como *stocks*, *plugs* e diques. Nesse contexto, a associação ultramáfico-carbonatítica em Catalão II é formada a partir de pelo menos três pulsos distintos variavelmente diferenciados, que evoluem a partir de um magma parental de composição silicato-carbonatítica. Fatores como a presença de xenólitos de fenitos com bordas de reação, padrões de elementos terras raras marcados pelo enriquecimento em terras raras pesados, valores elevados para a razão em Rb/Sr (0.06-0.31) e baixos para Gd/Lu (22.2-51.7) indicam que a contaminação crustal tenha tido uma contribuição importante na formação do tetraferrihogopita bebedourito. A presença de contatos gradacionais, a composição mineral caracterizada por *trends* contínuos em apatita (*i.e.* enriquecimento em SiO_2 e terras raras, depleção em CaO e P_2O_5), clinopiroxênio (*i.e.* enriquecimento em Na_2O , depleção em MgO), mica (*i.e.* enriquecimento em FeO e Fe_2O_3 , depleção em MgO e Al_2O_3) e calcita (*i.e.* enriquecimento em SrO), e a distribuição semelhante dos elementos-traço com um padrão fracionado pelo enriquecimento em terras raras leves indicam uma evolução via cristalização fracionada entre apatita bebedourito, tetraferrihogopita apatitito e diopsídio calcita carbonatito, e entre titanita bebedourito e aegirina-augita calcita carbonatito. Evidências que, adicionalmente, apontam a origem da mineralização ortomagmática de fosfato a partir do fracionamento de minerais silicáticos e enriquecimento relativo em apatita em sequências cumuláticas formadas por bebedouritos basais, rochas intermediárias ricas em apatita (*e.g.* apatititos) e calcita carbonatitos residuais.

PALAVRAS-CHAVE: Bebedouritos; Carbonatitos; Depósitos Ígneos de Fosfato.

ABSTRACT

The Catalão II complex is the northernmost Alto Paranaíba Igneous Province alkaline-carbonatite intrusion situated next to the homonymous city of Catalão (Goiás, Brazil). The complex is composed of bebedourites, phoscorites, and carbonatites, with subordinate alkali-feldspar syenites and ultramafic lamprophyres. Separate magmatic systems between the southern and northern portions are recognized based on differences in the mode of emplacement and predominant rock types. Catalão II South is predominantly composed of dikes and veins of evolved phoscorites and calcite- to dolomite carbonatites. On the other hand, Catalão II North is composed of bebedourites, calcite carbonatites, and late transgressive dikes that comprise phoscorites, calcite- to dolomite carbonatites, and alkali-feldspar syenite. Ultramafic lamprophyres are the last magmatic pulse in the area. Apatite-rich rocks host important phosphate resources in the northern portion. The area known as the Coqueiros deposit hosts phosphate resources estimated in the order of 45 Mt at a grade of 11.0% P_2O_5 for residual apatite in the weathering profile, and 410 Mt at a grade of 9.0% P_2O_5 for fresh rock apatite. The major apatite-bearing lithologies are the bebedourites and apatite. Phoscorites are volumetrically limited. Based on drill-core descriptions, petrographical characterization, hole-rock, and mineral composition, at least three bebedourite intrusive stages can be recognized and two of them can be paired with a respective carbonatite. The first intrusive stage is the tetraferriphlogopite bebedourite in the complex outer portion. The second stage is composed of apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and diopside calcite carbonatite as lens-shaped stocks and plugs. The third stage is formed by titanite bebedourite and aegirine-augite calcite carbonatite as small-scale stocks, plugs, and dikes. In that sense, the ultramafic-carbonatite association in Catalão II represents the result of a multistage emplacement, which involves at least three variably differentiated batches of a mixed silicate-carbonate magma. The presence of K-rich fenite xenoliths with reaction borders, the relative enrichment in heavy rare earth elements, high Rb/Sr (0.06-0.31), and low Gd/Lu (22.2-51.7) ratio suggest the contribution of crustal contamination in the tetraferriphlogopite bebedourite formation. Gradational contacts, continuous mineral composition trends in apatite (*i.e.* SiO_2 and REE increase, CaO e P_2O_5 depletion), clinopyroxene (*i.e.* Na_2O increase, MgO depletion), mica (*i.e.* FeO and Fe_2O_3 increase, MgO and Al_2O_3 depletion), calcite (*i.e.* SrO increase), and similar trace-element distribution with a fractionated pattern by the enrichment in light rare earth elements relative to heavy, show clear evidence of an evolution mechanism via fractional crystallization between apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and diopside calcite carbonatite, and between titanite bebedourite, and aegirine-augite calcite carbonatite. Features which, on the other hand, demonstrate that the orthomagmatic phosphate mineralization originates from an extensive fractionation of silicate minerals and relative apatite concentration in a cumulatic sequence composed of bottom bebedourites, intermediate apatite-rich rocks (*e.g.* apatite), and residual calcite carbonatites.

KEYWORDS: Bebedourites; Carbonatites; Igneous Phosphate Deposits.

SUMÁRIO

<u>1.</u>	<u>CAPÍTULO 1</u>	<u>18</u>
1.1	INTRODUÇÃO	18
1.1.1	ESCOPO DO TRABALHO	19
1.1.2	LOCALIZAÇÃO	20
1.1.3	HISTÓRICO PROSPECTIVO	21
1.1.4	TRABALHOS ANTERIORES SOBRE CATALÃO II	22
1.2	CLASSIFICAÇÃO E NOMENCLATURA	25
1.2.1	CARBONATITOS	26
1.2.2	FOSCORITOS	28
1.2.3	BEBEDOURITOS	31
1.2.4	LAMPRÓFIROS	33
1.3	COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTICOS	35
1.3.1	ASSOCIAÇÕES PETROGENÉTICAS	35
<u>2.</u>	<u>CAPÍTULO 2</u>	<u>39</u>
2.1	COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO CATALÃO II	39
2.1.2	CATALÃO II SUL	41
2.1.1	CATALÃO II NORTE	42
2.1.3	RECURSOS MINERAIS	45
2.2	PETROGRAFIA	46
2.2.1	ESTÁGIO I	46
2.2.2	ESTÁGIO II	49
2.2.3	ESTÁGIO III	56
2.2.4	ESTÁGIO IV	60
2.2.5	ESTÁGIO V	66
2.2.6	ESTÁGIO VI	70
2.2.7	ESTÁGIO VII	72
2.2.8	FENITOS	74

REFERÊNCIAS	77
3. CAPÍTULO 3 – MANUSCRITO	85
3.1 INTRODUCTION	85
3.2 GEOLOGICAL SETTING	86
3.3 THE CATALÃO II COMPLEX	89
3.4 MATERIALS AND ANALYTICAL PROCEDURES	91
3.5 THE COQUEIROS DEPOSIT	93
3.6 CLASSIFICATION AND PETROGRAPHY	93
3.7 MINERAL COMPOSITION	100
3.7.1 APATITE	100
3.7.2 CLINOPYROXENE	103
3.7.3 MICA	106
3.7.4 CARBONATES	112
3.7.5 Fe-Ti OXIDES	113
3.7.6 TITANITE	116
3.7.7 AMPHIBOLE	117
3.8 WHOLE-ROCK GEOCHEMISTRY	120
3.10 DISCUSSION	126
3.10.1 NOMENCLATURE CONSIDERATIONS	126
3.10.2 CONSTRAINTS ON THE ORIGIN OF CATALÃO II BEBEDOURITES AND CLINOPYROXENE CALCITE CARBONATITES	127
3.10.3 APATITE CONCENTRATION IN THE COQUEIROS DEPOSIT	132
3.11 CONCLUSIONS	133
4. CAPÍTULO 4	135
4.1 CONCLUSÕES	135
REFERÊNCIAS	136

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1.1** Mapa de localização da região de Catalão destacando as principais vias que dão acesso aos Complexos de Catalão I e II.....20
- Fig. 1.2 A)** Diagrama triangular de classificação formado por magnetita, forsterita e apatita para rochas da série foscorítica segundo Yegorov (1993). **B)** Classificação ampliada considerando variedades em que mineral magnésiano principal é diopsídio, segundo Krasnova *et al.*, (2004a) e Karchevsky & Moutte (2004). Abreviações são empregadas seguindo primeira letra de cada componente mineral, representados por **m**agnetita, **a**patita, **f**orsterita e **d**iopsídio.....29
- Fig. 1.3** Classificação simplificada das rochas da série bebedourítica (Brod *et al.*, 2004).....31
- Fig. 1.4** Ocorrências de carbonatitos magmáticos subdivididos em associações paragenéticas. Modificado de Woolley & Kjarsgaard (2008b).35
- Fig. 2.1** Modelo litológico do Complexo Catalão II. Adaptado de Palmieri (2011) e Ramos (2021).40
- Fig. 2.2** Mapa geológico da Mina Boa Vista no Complexo Catalão II. Adpatado de Ramos (2021).42
- Fig. 2.3** Foto aérea do *open pit* da Mina Boa Vista em Catalão, Goiás.45
- Fig. 2.4 Tetraferrihogopita bebedourito:** **A)** Variedade típica de granulação média fina, verde escuro e formada principalmente por clinopiroxênio e tetraferrihogopita; **B)** Domínio com alta proporção de clinopiroxênio e, localmente, com xenocristais de ortoclásio; **C)** Veio de carbonatito tardio marcado por halo de anfibólio de cor verde azulada; **D)** Veio de carbonatito com halo metassomático marcado pela presença de anfibólio e tetraferrihogopita tardia. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Cb – carbonato, Cpx – clinopiroxênio, Or – ortoclásio, Tfphl – tetraferrihogopita, ¹ – mineral primário e ² – mineral tardio.48
- Fig. 2.5 Tetraferrihogopita bebedourito:** **A)** Mapa multi-elementar por microfluorescência de raios X (micro-XRF), com composição correspondente a K-Mg-Ca, ilustrando textura granular formada por tetraferrihogopita, clinopiroxênio, apatita e xenocristais de ortoclásio; **B)** Textura granular formada por tetraferrihogopita e clinopiroxênio; **C)** Cristais de clinopiroxênio com inclusões de tetraferrihogopita e, localmente, bordas de anfibólio; **D)** Cristal anédrico de titanita de forma intersgranular entre os demais minerais; **E)** Composição modal de tetraferrihogopita bebedouritos em amostras representativas. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Or – ortoclásio, Tfphl – tetraferrihogopita e Ttn – titanita.....49
- Fig. 2.6** Variação modal observada entre fácies de apatita bebedourito e tetraferrihogopita apatitito em que é possível observar a diminuição da proporção de clinopiroxênio e respectivo aumento de apatita.50
- Fig. 2.7 Apatita bebedourito:** **A)** Dique centimétrico de apatita bebedourito intrusivo em tetraferrihogopita bebedourito; **B)** Variedade típica de apatita bebedourito de granulação média e mais alta proporção em clinopiroxênio (> 50 vol.%); **C)** Amostra ilustrando gradação entre bebedourito e domínio com maior proporção em apatita (> 30 vol.%). **Tetraferrihogopita apatitito:** **D)** Variedade típica formada por apatita, tetraferrihogopita e magnetita acessória; **E)** Domínio com alta proporção em apatita (> 70 vol.%). **Abreviações:** Amp – anfibólio, Ap – apatita, Cpx – clinopiroxênio, Mag – magnetita e Tfphl – tetraferrihogopita.....53
- Fig. 2.8 Diopsídio calcita carbonatito:** **A)** Variedade de granulação média e textura granular com cristais de calcita, clinopiroxênio, tetraferrihogopita, magnetita e titanita; **B)** Textura equigranular formada por cristais de calcita e acessórios de forma intergranular; **C)** Cumulados de apatita, tetraferrihogopita e magnetita entre cristais grossos de calcita; **D)** Variedade de granulação fina, verde escuro, com textura inequigranular formada por cristais de tetraferrihogopita em matriz com

calcita, clinopiroxênio e titanita. **Abreviações:** Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Mag – magnetita, Tfppl – tetraferroflogopita e Ttn – titanita. 54

Fig. 2.9 Apatita bebedourito: **A)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (K-Mg-Ca) ilustrando textura granular formada por clinopiroxênio, apatita, tetraferroflogopita e magnetita. **B)** Apatita intergranular entre cristais de clinopiroxênio e tetraferroflogopita. Localmente, cristais de flogopita apresentam *flakes* secundários nas bordas. **C)** Titanita intersticial com inclusões de apatita e magnetita. **Tetraferroflogopita apatitito:** **D)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (K-Mg-Ca) ilustrando textura granular formada por apatita, tetraferroflogopita e magnetita. **E)** Calcita intergranular entre cristais de apatita e tetraferroflogopita; **F)** Cristais euédricos de tetraferroflogopita com inclusões de apatita. **Diopsídio calcita carbonatito:** **G)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (K-Mg-P) em domínio marcado por elevada proporção em tetraferroflogopita; **H)** Agregados finos de magnetita e apatita intergranulares entre cristais grossos de calcita; **I)** Matriz equigranular formada por cristais de calcita, clinopiroxênio e tetraferroflogopita. **J)** Composição modal de litologias no estágio II para amostras representativas. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Di – diopsídio, Ilm – ilmenita, Mag – magnetita, Pyh – pirrotita, Tfppl – tetraferroflogopita, Ttn – titanita, ¹ – mineral primário, ² – mineral tardio. 55

Fig. 2.10 Variação modal observada entre fácies do titanita bebedourito representada por proporções distintas entre clinopiroxênio, apatita e titanita. 56

Fig. 2.11 Titanita bebedourito: **A)** Típica variedade de granulação média, cor verde escuro e textura granular formada por clinopiroxênio, apatita, tetraferroflogopita e titanita. **B)** Amostra de granulação média com calcita intergranular; **C)** Domínio marcado pela acumulação de titanita e, em menor proporção, clinopiroxênio e tetraferroflogopita. 58

Fig. 2.12 Aegirina-augita calcita carbonatito: **A)** Variedade típica de granulação média grossa e textura granular formada por calcita, clinopiroxênio, tetraferroflogopita e apatita. **B)** Variedade de granulação média fina. **C)** Amostra de granulação grossa formado por tetraferroflogopita e clinopiroxênio intergranulares entre cristais grossos de calcita. **Abreviações:** Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Tfppl – tetraferroflogopita e Ttn – titanita. 58

Fig. 2.13 Titanita bebedourito: **A)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (Ti-Mg-Ca) ilustrando textura granular; **B)** Cristais de clinopiroxênio e tetraferroflogopita; **C)** Fácies com apatita intergranular entre os cristais de clinopiroxênio; **D)** Cristais de clinopiroxênio com inclusões de titanita; **E)** Domínio com titanita e apatita intergranulares; **F)** Agregado radial de titanita. **Aegirina-augita calcita carbonatito:** **G)** Textura granular formada por cristais de calcita, clinopiroxênio e tetraferroflogopita; **H)** Textura granular em variedade de granulação média; **I)** Cristais de wadeita subédricos caracterizados por alto relevo e birrefringência em cores de terceira ordem. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Tfppl – tetraferroflogopita, Ttn – titanita e Wad – wadeita. 59

Fig. 2.14 Olivina foscrito: **A)** Variedade de aspecto verde escuro formada por cristais de magnetita e mosaico granular com apatita, olivina e menor tetraferroflogopita; **B)** Variedade de granulação média a grossa com cristais visíveis de olivina localmente com bordas de tetraferroflogopita. **Tetraferroflogopita foscrito:** **C)** Típica amostra de granulação média fina formado por abundante magnetita, tetraferroflogopita, apatita, *pockets* de calcita e menor pirocloro; **D)** Variedade com abundante calcita de forma intersticial aos demais minerais; **E)** Amostra com alta proporção em calcopirita. **Abreviações:** Ap – apatita, Cal – calcita, Ccp – calcopirita, Mag – magnetita, Ol – olivina, Pcl – pirocloro, Tfppl – tetraferroflogopita. 63

Fig. 2.15 Apatita foscrito: **A)** Variedade típica de granulação média formada por mosaico granular de apatita, magnetita, pirocloro e *pockets* de calcita; **B)** Apatita foscrito intergranular entre domínios de tetraferroflogopita foscrito; **C)** Cumulados de apatita foscrito entre *pockets* de calcita. **Texturas peculiares:** **D)** Domínio marcado pela acumulação de cristais de pirocloro; **E)**

- Intercrescimento dentrítico marcada por uma porção central com pirrotita e bordas de magnetita. 64
- Fig. 2.16 Tetraferriflogopita calcita carbonatito:** **A)** Variedade de granulação média grossa formada por agregado granular de calcita, tetraferriflogopita, magnetita, apatita e menor pirocloro. **B)** Amostra de granulação fina com tetraferriflogopita e magnetita disseminados. **C)** Variedade com aspecto branco e homogêneo, com baixa proporção em minerais não carbonáticos. **Abreviações:** Ap – apatita, Cal – calcita, Mag – magnetita, Pcl – pirocloro, Pyh – pirrotita e Tfphl – tetraferriflogopita. 64
- Fig. 2.17 Olivina foscrito:** **A)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (Mg-K-Ca) ilustrando textura granular composta por olivina, apatita e magnetita; **B)** Cristais subédricos de olivina em granulação fina; **C)** Magnetita intergranular englobando cristais de olivina e apatita. **Tetraferriflogopita foscrito:** **D)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (Mg-K-Ca) ilustrando textura granular composta por tetraferriflogopita, apatita, magnetita e calcita intersticial; **E)** Magnetita intergranular entre cristais de tetraferriflogopita e apatita; **F)** Pseudomorfo de olivina transformado em serpentina e clinohumita. **Apatita foscrito:** **G)** Textura granular composta por apatita, magnetita e menor pirocloro, com calcita intersticial; **H)** Cristais euédricos e zonados de pirocloro; **D)** Tetraferriflogopita com abundantes inclusões de apatita. **Tetraferriflogopita calcita carbonatito:** **J)** Textura granular composta por calcita, tetraferriflogopita e apatita; **K)** Cristal subédrico de pirocloro; **L)** Imagem de elétrons retroespalhados por microscopia eletrônica ilustrando dolomita e barita intergranulares entre cristais de calcita com exsoluções finas de estroncianita. **Abreviações:** Ap – apatita, Brt – barita, Cal – calcita, Ccp – calcopirita, Chu – clinohumita, Dol – dolomita, Mag – magnetita, Ol – olivina, Pcl – pirocloro, Pyh – pirrotita, Srp – serpentina, Str – estroncianita e Tfphl – tetraferriflogopita. 65
- Fig. 2.18 Dolomita carbonatito:** **A)** Fácies de cor branca e estrutura maciça; **B)** Variedade com estrutura bandada e cristais dentríticos de pirrotita e pirita. **Ferro-dolomita carbonatito:** **C)** Amostra com típica estrutura porosa e *vugs* de dissolução; **D)** Variedade rosada com alta proporção em barita, estroncianita e carbonatos de terras raras; **E)** Variedade bandada com cristais de pirita e galena. **Abreviações:** Ant – anatásio, Brt – barita, Cal – calcita, Dol – dolomita, Fe-Dol – ferro-dolomita, Gn – galena, Nst – norsethita, Py – pirita, Pyh – pirrotita, REE-Cb – carbonatos de terras raras e Str – estroncianita. 68
- Fig. 2.19 Dolomita carbonatito:** **A)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (Fe-Mg-Sr) ilustrando dolomita e norsethita granulares, e domínios intersticiais preenchidos por agregados finos de barita e estroncianita; **B)** Cristais de dolomita zonados com aspecto turvo pela presença de micro-inclusões; **C)** Norsethita em cristais euédricos. **Ferro-dolomita carbonatito:** **D)** Cristais de ferro-dolomita entre domínios intersticiais de barita, estroncianita e carbonatos de terras raras; **E)** Domínio intersticial fino com cristais de barita marcados pela alta birrefringência; **F)** Imagem de elétrons retroespalhados ilustrando cristais de barita, estroncianita, agregados finos de carbocernaita e qaqarssukita, e cristais euédricos de rippita. **Abreviações:** Ank – ankerita, Brt – barita, Cbc – carbocernaita, Dol – dolomita, Fe-Dol – ferro-dolomita, Nst – norsethita, Py – pirita, Qq – qaqarssukita, REE-Cb – carbonatos de terras raras, Rip – rippita e Str – estroncianita. 69
- Fig. 2.20 Álcali-feldspato sienito:** **A)** Variedade cinza claro, com textura granular; **B)** Fácies do sienito de granulação média; **C)** Calcita de forma intersticial entre cristais grossos de ortoclásio. 71
- Fig. 2.21 Álcali-feldspato sienito:** **A)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (Fe-Zr-Ca) em domínio com abundância em biotita e zircão intersticiais; **B)** Textura granular composta por cristais tabulares de ortoclásio; **C)** Cristais subédricos de zircão; **D)** Dalyita em agregado intersticial. **Abreviações:** Bt – biotita, Cal – calcita, Cb – carbonato, Dly – dalyita, Or – ortoclásio e Zrn – zircão. 71

Fig. 2.22 Olivina aillikito: **A)** Variedade típica de cor castanho escuro e textura inequigranular; **B)** Porção com textura de fluxo magmático marcada por faixas com colorações distintas; **C)** Domínio com abundância de glóbulos de calcita; **D)** Brecha com xenólitos de carbonatito e fenitos. 73

Fig. 2.23 A) Olivina aillikito formado por macrocristais euédricos de olivina e matriz com flogopita, calcita, minerais do grupo do espinélio e, localmente, tetraferriphlogopita; **B)** Aillikito com glóbulos de calcita entre matriz fina composta por flogopita, clinopiroxênio e minerais do grupo do espinélio. **Abreviações:** Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Ol – olivina, Phl – flogopita, Spl – minerais do grupo do espinélio e Tfphl – tetraferriphlogopita. 73

Fig. 2.24 Biotita ortoclásio fenito: **A)** Amostra de fenito em contato com carbonatito. Linha tracejada mostra contato entre fenito e zona de intensa transformação em biotita de forma proximal ao contato; **Clinopiroxênio ortoclásio fenito:** **B)** Fragmentos de clinopiroxênio ortoclásio fenito em textura de digestão por bebedourito. Zonação pode ser observada pela maior concentração de clinopiroxênio e anfibólio em direção às bordas e zona com alta proporção em tetraferriphlogopita imediatamente em contato com tetraferriphlogopita bebedourito; **C)** Fácies do fenito marcada por intenso metassomatismo com maior proporção em clinopiroxênio e anfibólio. Veios tardios de carbonatito cortam a amostra. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Bt – biotita, Or – ortoclásio e Tfphl – tetraferriphlogopita. 75

Fig. 2.25 Biotita ortoclásio fenito: **A)** Textura granoblástica marcada por cristais anédricos de ortoclásio e biotita intergranular; **B)** Domínio localmente com maior proporção em biotita. **Clinopiroxênio ortoclásio fenito:** **C)** Textura granoblástica constituída por ortoclásio, clinopiroxênio e anfibólio; **D)** Tetraferriphlogopita acessória de forma intergranular. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Bt – biotita, Or – ortoclásio e Tfphl – tetraferriphlogopita. 76

Fig. 3.1 Geological map of the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP) showing the distribution of the main carbonatite complexes, kimberlite, kamafugite and lamproite intrusions, and kamafugitic lavas (Oliveira *et al.*, 2004, Barbosa *et al.*, 2012; Cabral Neto *et al.*, 2017). 87

Fig. 3.2 Interpretive geological sketch of the Catalão II complex showing the distribution of main rock types (Palmieri *et al.*, 2022; Ramos, 2021). The location of Coqueiros, Morro do Padre, Boa Vista deposits, and examined drill cores are indicated on the map. 90

Fig. 3.3 Drill-core samples of bebedourites and associated carbonatites from the Catalão II complex. **A)** Fine-grained **tetraferriphlogopite bebedourite** containing similar modal proportions of clinopyroxene and tetraferriphlogopite. **B)** **Apatite bebedourite** with intergranular apatite between coarser grains of clinopyroxene and tetraferriphlogopite. Titanite and magnetite are accessories. **C)** **Tetraferriphlogopite apatite** with accessory magnetite. **D)** **Diopside calcite carbonatite** containing disseminated crystals of clinopyroxene, tetraferriphlogopite, and magnetite. **E)** **Titanite bebedourite** composed of coarse clinopyroxene, tetraferriphlogopite, and titanite, with intergranular calcite and apatite. **F)** Coarse-grained **aegirine-augite calcite carbonatite** containing subhedral crystals of calcite, clinopyroxene, and titanite, with small intergranular concentrations of apatite. **Abbreviations:** Ap – apatite, Cal – calcite, Cpx – clinopyroxene, Mag – magnetite, Tfphl – tetraferriphlogopite, and Ttn – titanite. 97

Fig. 3.4 Petrographic features from the Catalão II complex. **Tetraferriphlogopite bebedourite:** **A)** Composite map (μ -EDXRF) showing adcumulate texture composed of cumulus clinopyroxene, tetraferriphlogopite, apatite, locally with minor orthoclase xenocrysts; **B)** Typical light green clinopyroxene crystals and reddish orange tetraferriphlogopite with typical reverse pleochroism. **Apatite bebedourite:** **C)** Composite map (μ -EDXRF) with adcumulate to mesocumulate texture composed of cumulus clinopyroxene, tetraferriphlogopite, apatite, and intercumulus magnetite; **D)** Detail showing coarse tetraferriphlogopite lamellas (Tfphl¹) replaced in the borders by small tetraferriphlogopite flakes (Tfphl²). **Tetraferriphlogopite apatite:** **E)** Composite map (μ -

EDXRF) illustrating large tetraferriphlogopite and magnetite, with an intergranular mosaic of apatite; **F)** Intercumulus calcite and minor magnetite, between apatite and tetraferriphlogopite crystals. **Abbreviations:** Ap – apatite, Cal – calcite, Cpx – clinopyroxene, Mag – magnetite, Tfphl – tetraferriphlogopite, and Ttn – titanite. 98

Fig. 3.5 Petrographic features from the Catalão II complex. **Diopside calcite carbonatite:** **A)** Composite map (μ -EDXRF) showing a granular texture composed of calcite, tetraferriphlogopite and minor apatite. Accessory clinopyroxene crystals showing late substitution to amphibole in the borders; **B)** Fine-grained sample with large tetraferriphlogopite macrocrysts and an equigranular matrix composed of calcite and clinopyroxene. **Titanite bebedourite:** **C)** Composite map (μ -EDXRF) illustrating an adcumulate texture composed of clinopyroxene, tetraferriphlogopite, apatite, titanite, and minor intercumulus calcite; **D)** Ehdral titanite crystals, typical dark tetraferriphlogopite, and deep green clinopyroxene. **Aegirine-augite calcite carbonatite:** **E)** Granular texture composed of calcite, tetraferriphlogopite, clinopyroxene, and minor titanite; **F)** Coarse-grained sample showing zoned clinopyroxene crystals. **Abbreviations:** Amp – amphibole, Ap – apatite, Cal – calcite, Cpx – clinopyroxene, Mag – magnetite, Tfphl – tetraferriphlogopite, and Ttn – titanite. 99

Fig. 3.6 A) Compositional variation of Catalão II apatite expressed in terms of Sr, Ca+P, and Si+REE (*a.p.f.u.*). **B)** Apatite compositional fields from Catalão I (Cordeiro *et al.*, 2010), and Salitre I (Barbosa *et al.*, 2012, 2020). 102

Fig. 3.7 A) Compositional variation of Catalão II clinopyroxenes expressed in terms of diopside (Di), hedenbergite (Hd) and aegirine (Aeg) end-members molecules estimated based on the Mg, Fe²⁺ + Mn and Na contents, respectively. **B)** Clinopyroxene compositional trends from Mata da Corda kamaugites (Sgarbi *et al.*, 2000), Salitre I bebedourites (Barbosa *et al.*, 2012), Tapira bebedourites (Brod, 1999) and worldwide carbonatites (Reguir *et al.*, 2012). 105

Fig. 3.8 A) ^(IV)Al and ^(IV)Si (*a.p.f.u.*) variation for Catalão II showing the change between reverse pleochroism and normal mica. **B)** Photomicrograph in plan-polarized light illustrating characteristic reverse pleochroism tetraferriphlogopite and **C)** normal pleochroism phlogopite. 107

Fig. 3.9 Compositional variation of Catalão II micas in terms of Mg, Al, Fe²⁺, and Fe³⁺ (*a.p.f.u.*). 108

Fig. 3.10 Petrographic features from Catalão II micas. **A)** Phlogopite core with tetraferriphlogopite rim in apatite bebedourite. **B)** Typical dark tetraferriphlogopite in titanite bebedourite. **C)** Coarse tetraferriphlogopite pseudomorph replaced by fine tetraferriphlogopite flakes. **D)** Clinopyroxene pseudomorph replaced by fine amphibole aggregates and tetraferriphlogopite flakes. 110

Fig. 3.11 Compositional trends for APIP alkaline complexes: Tapira (Brod, 1999; Brod *et al.*, 2001), Salitre I (Barbosa *et al.*, 2012, 2020), and Catalão I (Araújo, 1996; Brod *et al.*, 2001; Cordeiro *et al.*, 2010). 112

Fig. 3.12 Ca and Sr (*a.p.f.u.*) variation for Catalão II calcite showing the general Sr enrichment trend according to the 1:2 substitution line. 112

Fig. 3.13 A) Compositional variation of Catalão II Fe-Ti oxides in terms of Ti, Fe²⁺, and Mg (*a.p.f.u.*). Ideal end-members are plotted for comparison: Ilm – ilmenite, Mag – magnetite, Mfr – magnesioferrite, and Uspl – ulvöspinel. **B)** Mg and Ti (*a.p.f.u.*) variation for magnetite showing the general Ti and Mg depletion trend. Magnetite compositional fields are given for Tapira (Brod *et al.*, 2005) and Salitre I rocks (Barbosa *et al.*, 2012, 2020). Note that less differentiated rocks such as wehrlites have more Ti, and Mg-rich magnetite than related bebedourites and carbonatites. 115

Fig. 3.14 Ca+Ti and Nb+Fe³⁺+Zr (*a.p.f.u.*) variation for Catalão II titanite, showing the general depletion in Ca and Ti according to a 1:6 substitution line. 116

- Fig. 3.15 A)** Compositional variation for Catalão II amphiboles in terms of Na+Ca, Mg, and $\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}$ (*a.p.f.u.*), showing the general Mg decrease coupled with a Fe^{2+} enrichment. **B)** Compositional variation in terms of K, Ca, and Na (*a.p.f.u.*), showing the Ca decrease and respective Na increase. 118
- Fig. 3.16** Harker variation diagram for Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites. The average composition of major mineral components is plotted for comparison (*i.e.* Cpx – clinopyroxene, Tfphl – tetraferriphlogopite, Mag – magnetite, Cal – calcite, Ap – apatite, Ttn – titanite, Ilm – ilmenite). 123
- Fig. 3.17 A)** Chondrite-normalized REE patterns of Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites. Normalization factors from Boynton (1984). **B)** Chondrite-normalized incompatible element distribution. Normalization factors from Thompson *et al.* (1984). *Pm calculated based on the geometric mean between Nd and Sm. Catalão II fenite field is plotted for comparison. Fenites trace-element analyses are available on supplementary data (Table J). Araxá amphibolite data from Klein (2008). Shaded fields in the following diagrams represent previous unit ranges. 125
- Fig. 3.18** REE patterns of Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites normalized from a medium ultramafic lamprophyre composition calculated from data available by Guarino *et al.* (2103). *Pm calculated based on the geometric mean between Nd and Sm. 129
- Fig. 3.19** Conceptual sketch of mineral textures of Catalão II rocks intrusive stages: **A)** Stage I – tetraferriphlogopite bebedourite; **B)** Stage II – apatitite bebedourite, tetraferriphlogopite apatitite, and diopside calcite carbonatite; **C)** Stage III – titanite bebedourite and aegirine-augite calcite carbonatite. Mg# ($\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$) is indicated for clinopyroxene and mica. 131

LISTA DE TABELAS

Tab. 1.1 Termos utilizados para classificação de rochas nos principais trabalhos em Catalão II.	26
Tab. 1.2 Classificação de lamprófiros baseada na proporção entre os minerais principais. Modificado de Le Maitre <i>et al.</i> (2002). Abreviações: Or – ortoclásio, Pl – plagioclásio, Fsp – feldspato e Foid – feldspatóide.....	34
Tab. 1.3 Principais complexos carbonatíticos com ocorrência de foscoritos. Adaptado de Krasnova <i>et al.</i> (2004a).	37
Tab. 2.1 Compilação de idades obtidas em rochas do Complexo Catalão II.	39
Tab. 2.2 Paragênese mineral para as principais litologias magmáticas no Complexo Alcalino-Carbonatítico Catalão II destacando os respectivos estágios intrusivos definidos por relação de corte.	44
Tab. 2.3 Sequência de cristalização de minerais principais para o tetraferriflogopita bebedourito.	47
Tab. 2.4 Sequência de cristalização de minerais principais para o apatita bebedourito e tetraferriflogopita apatitito.	52
Tab. 2.5 Sequência de cristalização dos principais minerais no titanita bebedourito.	57
Tab. 2.6 Sequência de cristalização dos minerais principais nos foscoritos.	62
Tab. 3.1 Sequence of bebedourites and early calcite carbonatites of the Catalão II complex.	94
Tab. 3.2 Representative apatite analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on a total of eight cations in the A and X sites. OH was calculated assuming (F+Cl+OH)=1 in the Z site. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.	101
Tab. 3.3 Representative clinopyroxene analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on a total of six atoms of oxygen. Fe ₂ O ₃ * was calculated assuming stoichiometry. Mg# = MgO/(MgO+FeO+Fe ₂ O ₃)*100. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.....	104
Tab. 3.4 Ideal end-member compositions for trioctahedral micas in accordance with the International Mineralogical Association (IMA) nomenclature.	106
Tab. 3.5 Representative mica analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on a total of 24 atoms of oxygen. Fe ₂ O ₃ * was calculated based on ^(IV) Fe ³⁺ = 8 – Si – ^(IV) Al, according to procedures described by Araújo (1996). H ₂ O* was calculated assuming stoichiometry. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.....	109
Tab. 3.6 Representative calcite analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on 6 oxygens. CO ₂ was calculated assuming stoichiometry. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.	113
Tab. 3.7 Representative Fe-Ti oxides analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on 4 and 6 oxygens, respectively. Fe ²⁺ /Fe ³⁺ was calculated from stoichiometry. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.....	114
Table 3.8 Representative titanite analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on 20 oxygens. FeO _T from the EPMA data was recast as Fe ₂ O ₃ . (-) in the table correspond to analyses below the detection limit. (n.a.) in the table correspond to not analyzed oxides.	117

Tab. 3.9 Representative amphibole analyses from Catalão II rocks. Structural formulae were calculated based on 23 oxygens. Fe ₂ O ₃ and FeO were recalculated according to Schumacher (1997). (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.	119
Tab. 3.10 Major whole-rock composition averages and ranges of Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites.	122
Tab. 3.11 Trace-element composition averages and ranges of Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites.	124

1.1 INTRODUÇÃO

O Complexo Alcalino Carbonatítico de Catalão II em Goiás compreende uma das últimas grandes intrusões alcalinas descobertas na Província Ígnea do Alto Paranaíba. Potencial econômico é conhecido na área desde meados das décadas de 70 e 80, principalmente para *commodities* como nióbio e fosfato. A partir do início das operações da Mina Boa Vista em 1999, o complexo começa a ser explorado para nióbio com recursos atualmente estimados na ordem de 53 Mt a 1,3 % Nb₂O₅ (Boa Vista e Morro do Padre). Área denominada como o depósito Coqueiros soma recursos de fosfato estimados em 453 Mt a 9,3 wt.% P₂O₅ (CMOC, 2022).

Os fosfatos são compostos com aplicações diversas, como na indústria química, na produção de ração animal e, principalmente, na produção de fertilizantes. Atualmente, o Brasil figura entre os principais produtores e exportadores de gêneros agrícolas e, frente à expansão da fronteira agropecuária nas últimas décadas, em especial a partir dos anos 1970, houve uma crescente procura por depósitos de fosfato para suprir a demanda interna por fertilizantes.

Dentre os principais depósitos de rocha fosfática, se destacam os de origem sedimentar associados a fosforitos marinhos (Pufahl & Groat, 2016). Algumas das maiores reservas desses depósitos estão localizadas em países como China, Marrocos e Estados Unidos, que juntos respondem por quase 70% da produção mundial para essa *commodity* (U.S. Geological Survey, 2022). No Brasil, em oposição ao cenário das maiores reservas mundiais, as principais minas atualmente em produção operam em depósitos de origem ígnea, a exemplo dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba como Tapira, Araxá e Catalão I (Gibson *et al.*, 1995; Fonseca, 2018).

Nesses depósitos, o controle da mineralização envolve diversos fatores que abrangem desde processos magmáticos a supergênicos. Aspectos como composição, estágio de evolução e mecanismos de diferenciação dos magmas são controles metalogenéticos importantes para a formação de rochas potencialmente ricas em apatita, como carbonatitos, foscoritos e bebedouritos (Barbosa *et al.*, 2012, Brod *et al.*, 2013). De forma complementar a esses processos, o intemperismo químico é um agente responsável pela concentração de teores economicamente viáveis de fosfato. Devido à baixa resistência ao intemperismo de parte dos minerais formadores dessas rochas, a apatita pode persistir como mineral residual no perfil intempérico (Toledo *et al.*, 2004). Virtualmente todos os depósitos ativos de fosfato na região do Alto Paranaíba operam explorando concentrações econômicas no perfil de intemperismo. Jacupiranga (Ribeiro *et al.*,

2014) e Angico dos Dias (Luciano, 2016) são os único depósito de fosfato de origem ígnea explorado em rocha fresca no Brasil.

Depósitos de fosfato em rocha fresca estão associados à alguns fatores limitantes para exequibilidade econômica, como o custo mais elevado de produção e a necessidade de adequação de novos processos geometalúrgicos. No entanto, a crescente demanda interna por fertilizantes como bem mineral estratégico para manutenção da balança comercial brasileira, tem fomentado o interesse por novas fontes de fosfato, como estabelecido nas diretrizes do novo Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050 publicado pelo Governo Federal (Brasil, 2021).

1.1.1 ESCOPO DO TRABALHO

O Depósito Coqueiros representa uma importante concentração ortomagmática de apatita localizada no Complexo de Catalão II que ainda permanece pouco conhecida e inexplorada. Tendo em vista a grande diversidade de tipos de rochas e a dificuldade no acesso a amostras de rocha fresca, somente possíveis através de furos de sondagem, boa parte dos estudos publicados na área tem como temática assuntos específicos relacionados à mineralização de nióbio (*e.g.* Palmieri *et al.*, 2022). Nesse sentido, no presente trabalho será abordada a geologia do complexo de forma abrangente, com especial foco para as rochas com potencial econômico de fosfato.

O objetivo consiste em investigar a petrologia e metalogênese das rochas ígneas que abrigam o Depósito Coqueiros no Complexo Catalão II. O melhor entendimento dos tipos litológicos e processos que atuaram na formação do depósito pode auxiliar no prosseguimento de estudos de viabilidade econômica e na busca por novos prospectos associados a maciços alcalinos. Dentre os desdobramentos da pesquisa, destaca-se objetivos específicos como:

- I. Caracterizar e estabelecer nomenclatura adequada para as rochas no complexo;
- II. Investigar a origem de rochas ultramáficas em complexos alcalino-carbonatíticos;
- III. Investigar os mecanismos de diferenciação e seu papel na formação de rochas ultramáficas e carbonatitos;
- IV. Determinar os mecanismos magmáticos responsáveis pela concentração de apatita em depósitos ígneos de fosfato.

1.1.2 LOCALIZAÇÃO

O Complexo de Catalão II ($18^{\circ}02'S$; $47^{\circ}52'W$) está localizado na região sudeste do Estado de Goiás, a aproximadamente 22 km ao norte da cidade de Catalão e 260 km da capital Goiânia. A principal via de acesso se dá através da BR-050, importante rodovia federal que faz ligação entre as cidades de Brasília (a 315 km) e São Paulo (a 695 km). A cerca de 12 km em linha reta de Catalão II encontra-se também o Complexo Catalão I, uma das grandes intrusões alcalinas na região localizada entre os municípios de Catalão e Ouvidor (**Fig. 1.1**).

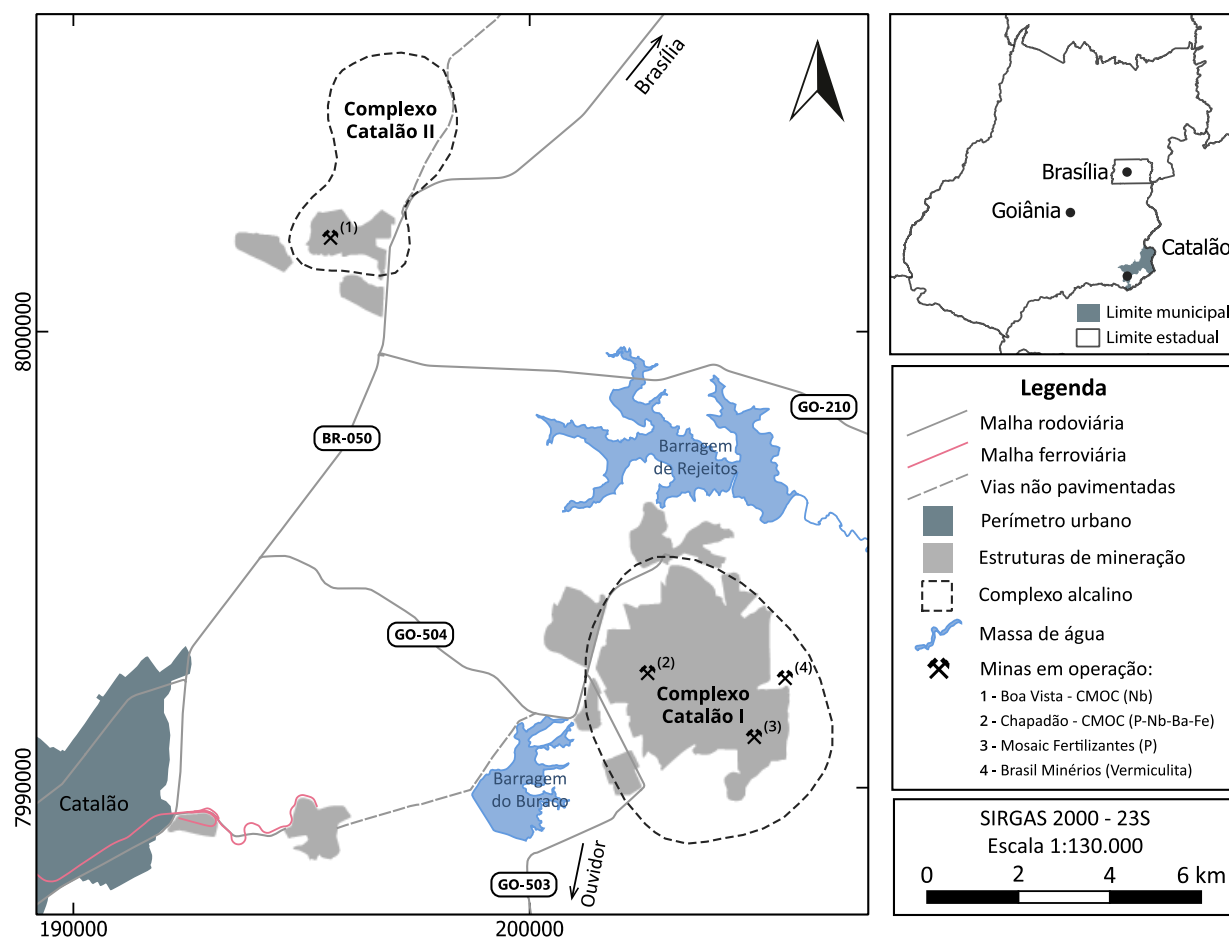


Fig. 1.1 Mapa de localização da região de Catalão destacando as principais vias que dão acesso aos Complexos de Catalão I e II.

1.1.3 HISTÓRICO PROSPECTIVO

O Complexo Catalão II foi descoberto no final da década de 60 como parte do Projeto Chaminés (Barbosa *et al.*, 1970) executado pela Prospec sobre demanda do Departamento Nacional de Mineração (DNPM). A partir do final dos anos 60 até meados de 70, pesquisa geológica foi desenvolvida pela empresa Mineração Diadema vinculada à Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). Potencial para nióbio laterítico foi identificado em determinadas regiões do complexo, denominadas naquele contexto de “Anomalia A”, “Anomalia B” e “Anomalia C”, que mais tarde seriam conhecidas como a atual Mina Boa Vista, depósito Morro do Padre e Mineração Farm, respectivamente (Palmieri *et al.*, 2008).

Mineração Catalão de Goiás, empresa vinculada a Anglo American, realiza o requerimento de áreas em torno da área de propriedade da CBMM (Anomalias A e B, uma vez que a área da Anomalia C havia sido liberada), para pesquisa de nióbio e fosfato. Todas as áreas foram pesquisadas, mas somente na porção norte do complexo foram encontradas evidências consistentes de mineralização de nióbio, fosfato e cobre na “Anomalia C” e de fosfato, naquela que foi denominada de “Anomalia D”. A primeira conhecida hoje como Depósito Mineração Farm e a segunda corresponde à parte central da Depósito Coqueiros. Essas anomalias foram testadas através de quatro furos totalizando aproximadamente 1.720 m de sondagem diamantada. Devido a condições de contorno inerentes ao período e à diretrizes estratégias da empresa naquela ocasião, as pesquisas foram interrompidas e a área descartada.

Em 1990 a CBMM concede a área da porção sul, representadas pelas anomalias A e B, para a Mineração Catalão. Após aquisição da área, novas companhias de prospecção foram realizadas ao longo da década de 90. Primeira campanha de sondagem foi feita entre 1992 e 1993 somando 1.095 m. Posteriormente no decorrer de 1997, total de 1.243 m de sondagem foram executados. Em 1999 a Mina Boa Vista começa as atividades de lavra a céu aberto explorando nióbio a partir de pirocloro residual no perfil de intemperismo. Nesse período, reservas estimadas somavam total de 3.536 mil toneladas a 1,62% de Nb₂O₅.

Em 2003 a área norte do complexo foi novamente requerida pela empresa Anglo American que iniciou trabalhos de exploração sistemática. Os primeiros levantamentos de geoquímica de superfície foram realizados concomitantes aos primeiros furos exploratórios no alvo Coqueiros, em 2004. Campanhas de sondagem exploratória foram realizadas entre os anos de 2005 e 2006 somando um total de aproximadamente 8.200 m. Detalhamento e adensamento da malha de sondagem foi feito em 2007, com mais 2.870 m perfurados. Recursos estimados nesse período para o Depósito Coqueiros somam 54,6 Mt a 11,7 % de P₂O₅ para minério oxidado e 60,3 Mt a 8,4 % para rocha fresca.

A partir do furo exploratório feito em 1983 na então “Anomalia D” e também das sondagens realizadas no início do ano 2000, mineralização de fosfato em rocha fresca se tornou conhecida no depósito Coqueiros. Em 2009, foi realizado um furo profundo (CATIII1) na parte central depósito, no qual constatou-se que a mineralização continuava em profundidade para além dos 803.9 m correspondente à profundidade deste furo. De posse dessa comprovação, em 2010 a Anglo American implementou uma campanha de furos profundos, ampliando ainda mais os conhecimentos deste depósito.

Em 2016 a CMOC *Group* adquire as operações de nióbio e fosfato da Anglo American no Brasil. Atualmente no Complexo Catalão II, a Mina Boa Vista é o único depósito em atividade explorando nióbio em rocha fresca, após a exaustão das reservas de minério oxidado a partir de meados de 2014. Direito de pesquisa de outros depósitos potenciais (*i.e.* Morro do Padre, Coqueiros e Mineração Farm) também foram adquiridos pela CMOC. O depósito Morro do Padre configura, no presente, como um alvo *near mine* para nióbio localizado nas proximidades da Mina Boa Vista. Coqueiros e Mineração Farm representam alvos *brownfield* ainda em fase de avaliação da viabilidade econômica.

1.1.4 TRABALHOS ANTERIORES SOBRE CATALÃO II

Série de estudos acadêmicos foram publicados sobre rochas do Complexo Catalão II. Dentre os principais trabalhos, destacam-se Machado Júnior (1991), Melo (1999), Palmieri (2011), Palmieri *et al.* (2022) e Guarino *et al.* (2013, 2016). Outras publicações com contribuições são Gibson *et al.* (1995), Rocha *et al.* (2001), Gomide (2011, 2015), Gomide *et al.* (2013, 2016) e Ruiz *et al.* (2022).

Machado Júnior (1991) foi responsável pela primeira descrição das unidades que compõem o Complexo Catalão II. São descritas séries de piroxenitos, sienitos, foscoritos, carbonatitos e lamprófiros em diferentes estágios, como também rápida descrição dos fenitos e rochas encaixantes. Com base em diferenças no estilo de intrusão e tipos predominantes de rochas, o autor indica a existência de dois condutos principais no complexo e propõe a distinção desses domínios como Pipes Norte e Sul. Posteriormente, idade estimada em 83 Ma é apresentada por Machado Júnior (1992) utilizando isócrona por Rb-Sr em análises de concentrados minerais e rocha total.

Gibson *et al.* (1995) descreve diques ultramáficos anteriormente denominados como lamprófiros por Machado Junior (1991) e propõem a utilização do termo flogopita picrito para tais rochas comumente encontradas nos complexos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Dentre várias contribuições, os autores apontam a passagem da Pluma de Trindade sob a plataforma sul-americana como principal agente para a formação do magmatismo alcalino na região.

Melo (1999) apresenta detalhamento de séries de rochas indicadas por Machado Junior (1991), fundamentado em dados petrográficos e composição mineral de olivina, clinopiroxênio e espinélios. O autor reconhece ocorrência de quatro subtipos de clinopiroxenitos (*e.g.* clinopiroxenito cumulus, apatita clinopiroxenito, titanita clinopiroxenito, carbonato clinopiroxenito) em associação com flogopitito, e quatro estágios de carbonatitos (*e.g.* magnetita-pirocloro-flogopita carbonatito, ilmenita-flogopita carbonatito, calciocarbonatito e magnesiocarbonatito). Novos dados são também apresentados para sienitos, foscoritos e lamprófiros.

Rocha *et al.* (2001) estudam a alteração e a evolução química do pirocloro no perfil intempérico. Os resultados são baseados em técnicas analíticas como a caracterização petrográfica por microscopia óptica e eletrônica, e composição química por microsonda eletrônica. Bordas de transformação tardia do pirocloro são identificadas como zirconolita $[(Ca,Ce)Zr(Ti,Nb,Fe^{3+})_2O_7]$, baddeleyita (ZrO_2) e columbita ($Fe^{2+}Nb_2O_6$). Os autores consideram que zonas de concentração de pirocloro no perfil intempérico estão associadas a porções com aglomerados de magnetita, a partir da alteração de foscoritos e carbonatitos. O pirocloro primário é determinado como cálcio-pirocloro e sua alteração supergênica como marcada pela lixiviação de Ca, Na e F, e respectiva substituição por Ba, REE (terras raras) e OH. Portanto, tendo a formação de espécies secundárias de bário- e cério-pirocloro com eventuais inclusões de nióbio-anatásio, a partir da alteração do cálcio-pirocloro primário.

Baseado em extenso banco de dados adquiridos a partir de campanhas de sondagem exploratória, Palmieri (2011) apresenta modelo geológico e estimativa de recursos para o depósito de nióbio Morro do Padre no complexo. O modelo reconhece geometria verticalizada em forma de *pipe* para rochas no depósito e individualiza três setores com base no tipo e forma de ocorrência do minério, sendo zona inferior representada por carbonatitos e foscoritos em intrusões de maiores dimensões como *sills* e *plugs*, zona intermediária formada pelo predomínio de veios e diques, e zona superior pelo minério residual no perfil de intemperismo. O autor importa nomenclaturas utilizadas em Catalão I por Cordeiro *et al.* (2010), e reconhece dois tipos de foscoritos como apatita nelsonito e pseudo-nelsonito. Carbonatitos são divididos em calciocarbonatito e magnesiocarbonatito. Posteriormente, esse trabalho de dissertação foi reeditado e publicado por Palmieri *et al.* (2022). Nessa nova revisão, os autores abandonam a utilização do termo nelsonito e optam pela substituição por tetraferriflogopita foscorito.

Gomide (2011) e em seguida Gomide *et al.* (2013) comparam amostras de carbonatitos de diversas ocorrências brasileiras, dentre elas Catalão II, e estudam as implicações da variação dos isótopos de enxofre em sulfetos e sulfatos. Os dados isotópicos apontam que texturas

caracterizadas por cristais alongados de sulfetos, como pirrotita e pirita, comuns em calcita carbonatitos são resultado da cristalização por resfriamento rápido durante a desgaseificação desses magmas carbonatíticos.

Gomide (2015) e em publicação por Gomide *et al.* (2016) novamente comparam diferentes ocorrências, porém se utilizam de conjuntos de dados petrográficos, litogeoquímica e isótopos estáveis. Autores apontam evolução para carbonatitos pelo fracionamento em apatita, flogopita, dolomita e calcita, pareado com enriquecimento em monazita, norsethita e estroncianita. Pelo menos dois estágios de carbonatitos são reconhecidos em Catalão II como cálcio- e magnesiocarbonatito, com base em diferenças composicionais e mineralógicas. O cálcio- carbonatito é caracterizado como um estágio menos evoluído, com predomínio de calcita e acessórios como apatita e flogopita. Magnesiocarbonatito é definido pela presença de dolomita e Fe-dolomita como carbonatos dominantes e marcado por um forte enriquecimento em Ba-Sr devido ocorrências de fases acessórias como barita, norsethita e estroncianita.

Guarino *et al.* (2013) apresenta dados sobre diques ultramáficos de Catalão II em trabalho de comparação regional no Alto Paranaíba. Em virtude de estudos anteriores (Gibson *et al.*, 1995), os autores aderem o termo flogopita picrito para designar os diques. Novas datações por U-Pb em perovskita estimam idades entre 82-90 Ma para o complexo. Dentre as contribuições, autores apontam assinaturas isotópicas características de fonte compatíveis com manto litosférico e argumentam contra a influência de uma pluma como fonte para o magmatismo alcalino regional.

Guarino *et al.* (2016) agregam contribuições sobre demais litotipos através de dados petrográficos, composição mineral, litogeoquímica e dados isotópicos. Os autores descrevem predominantemente tipos litológicos da porção sul do complexo, como Boa Vista e Morro do Padre. São descritos dois tipos de carbonatitos formados predominantemente por calcita, sendo eles cálcio- carbonatito e ferrocarbonatito. Ferrocarbonatito é diferenciado quimicamente devido maior proporção em magnetita e flogopita. Clinopiroxenitos são mencionados como fenitos de origem metassomática. O termo foscorito não é empregado, e rochas correspondentes são descritas como apatitito e magnetitito. Origem das rochas é interpretada como decorrente do fracionamento de apatita, magnetita e flogopita a partir de líquidos carbonatíticos em repetidos eventos de reinjeção magmática. Em novo trabalho, Guarino & Brigatti (2018) também acrescenta informações a respeito da composição química de micas para esses tipos litológicos. Autores sugerem a existência de diferentes populações de micas cristalizadas em condições de alta fugacidade de oxigênio e marcadas por alto conteúdo em Fe³⁺.

Ruiz *et al.* (2022) acrescenta discussões a respeito dos diques ultramáficos no complexo. Nomenclatura é alvo de debate, tendo em vista controvérsia na literatura pela utilização do termo lamprófiro ou flogopita picrito. Frente a publicações mais recentes como Tappe *et al.* (2005, 2006), autores argumentam pela classificação como olivina aillikito seguindo nomenclatura de lamprófiros ultramáficos. Relação genética entre aillikitos e kamafigitos na província é proposta com base em evidências como distribuição temporal e espacial, além de assinaturas químicas e isotópicas similares.

1.2 CLASSIFICAÇÃO E NOMENCLATURA

No estudo de carbonatitos e rochas alcalinas associadas, classificação e nomenclatura pode representar um especial desafio no desenvolvimento de uma pesquisa. Alguns tipos de rochas com ocorrência mais restrita no registro geológico são frequentemente pouco discutidos em referências base como a classificação internacional de rochas ígneas pela IUGS. Desde a publicação de Le Maitre *et al.* (2002), um número importante de revisões de nomenclatura tem sido propostas frente ao desenvolvimento e publicação de novos estudos (Krasnova *et al.*, 2004a; Tappe *et al.*, 2005; Mitchell, 2005; Yaxley *et al.*, 2022; Mitchell & Gittins, 2022; Oliveira *et al.*, 2022).

Dentre as principais associações de rochas em complexos no Alto Paranaíba, destacam-se carbonatitos, bebedouritos, foscoritos e lamprófiros. Nomenclaturas para essas associações têm evoluído nas últimas duas décadas, sendo necessárias adequações às modificações propostas, além de uma revisão dos termos e critérios que serão adotados no desenvolvimento do trabalho.

Nesse sentido, as propostas de nomenclatura divergem na literatura para rochas no Complexo Catalão II. Diferentes abordagens, limitações no suporte amostral e evolução da nomenclatura no tempo são fatores que contribuem para discordância entre os termos utilizados. A seguir, a **Tab. 1.1** resume a classificação utilizada para cada tipo de rocha correspondente nas principais referências que abordam a geologia do complexo (Machado Júnior, 1991; Melo, 1999; Palmieri, 2011; Guarino *et al.*, 2016).

Tab. 1.1 Termos utilizados para classificação de rochas nos principais trabalhos em Catalão II.

Machado Júnior (1991)	Melo (1999)	Palmieri (2011)	Guarino <i>et al.</i> (2016)
K-fenitos	K-fenitos	Filito	Sienito
Na-fenitos	Na-fenitos	Anfibolito	Anfibólio clinopiroxenito
Piroxenito	Clinopiroxenito cumulus	Piroxenito/Bebedourito	
	Apatita clinopiroxenito		
Álcali piroxenito	Titanita piroxenito		
	Carbonato piroxenito		
Glimerito	Flogopitito		Flogopitito
Quartzo sienito	Sienito	Sienito	Sienito
Álcali Feldspato Sienito			
Foscorito	Foscorito	Flogopita foscorito	-
Rocha mineralizada	-	Apatita nelsonito	Apatitito
		Pseudonelsonito	Magnetitito
Sílico sovito	Magnetita-pirocloro-flogopita carbonatito	Cálciocarbonatito	Ferrocarbonatito
	Ilmenita-flogopita carbonatito		
Sovito	Cálciocarbonatito		
Sovito Anquerítico			
Beforsito	Magnésiocarbonatito	Magnésiocarbonatito	-
Lamprófiro	Lamprófiro	Flogopita picrito	Flogopita picrito

1.2.1 CARBONATITOS

Segundo Le Maitre *et al.* (2002), carbonatitos são definidos como rochas plutônicas ou vulcânicas que devem conter proporção modal superior a 50% de carbonato de origem ígnea. Duas classificações são tradicionalmente previstas, seguindo critérios de mineralogia ou a partir da composição química. A classificação mineralógica segue a proporção do tipo de carbonato predominante, como calcita carbonatito ou dolomita carbonatito. Nos casos em que os carbonatos dominantes são ankerita/siderita ou carbonatos alcalinos devem ser usados os termos ferrocarbonatito e natrocarbonatito, respectivamente. Termos como sovito e alvikito (*e.g.* variedades calcíticas) ou beforsito (*e.g.* variedades dolomíticas) são alternativamente previstos.

Classificação química pode ser utilizada para variedades em que identificação dos carbonatos seja dificultada, como em casos de rochas de granulação muito fina ou formadas por carbonatos com soluções sólidas complexas de Ca-Mg-Fe. Nesses cenários, diagrama composicional proposto por Woolley & Kempe (1989) prevê classificação em cálcio carbonatito, magnésiocarbonatito e ferrocarbonatito, com base nas porcentagens em peso de CaO, MgO, FeO,

Fe₂O₃ e MnO. Exceção se aplica para variedades em que composição em SiO₂ atinge valores superiores a 20 wt.% que, por sua vez, devem ser discriminadas como silicocarbonatitos.

Em ampla revisão sobre carbonatitos e associações de rochas, Mitchell (2005) propõe nova classificação genética. Definição puramente descritiva é considerada como inadequada pelo autor, tendo em vista que diferentes processos são reconhecidos como caminhos possíveis na geração de rochas que mineralogicamente convergem em variedades ricas em carbonato. Dessa forma, é feita distinção entre carbonatitos *bona fide*, rochas primárias de origem magmática, e resíduos carbótermas derivados a partir de fluidos de baixa temperatura enriquecidos em CO₂, flúor e H₂O. Em contraposição a Le Maitre *et al.* (2002), carbonatitos *lato sensu* são considerados como qualquer rocha que contenha proporção superior a 30 vol.% de carbonato, sem restrição ao conteúdo em sílica. Utilização do termo silicocarbonatito é desaconselhada, pela imprecisão em não especificar minerais silicáticos presentes e por representar uma tendência em separar de forma excessiva variedades cogenéticas formadas por diferentes proporções modais.

Em trabalhos mais recentes, classificação mineralógica descritiva tem sido preferência comum entre autores (Chakhmouradian *et al.*, 2015; Doroshkevich *et al.*, 2017). Yaxley *et al.* (2022) argumenta que a composição química de carbonatitos, em geral, não é equivalente aos magmas a partir dos quais as rochas foram cristalizadas. Presença de minerais não carbonáticos como magnetita, flogopita, olivina ou clinopiroxênio, pode falsear a composição química para um tipo de classificação que não representa o tipo de carbonato dominante. Como exemplo, um carbonatito calcítico que contenha olivina e flogopita em abundância, pode ser classificado quimicamente como um magnesiocarbonatito, sugerindo erroneamente a presença de dolomita. Dessa forma, recomenda-se como alternativa a utilização dos minerais essenciais como prefixos, excluindo possíveis modificações sub-sólidas. Nesse sentido, minerais não carbonáticos de interesse também podem ser adicionados ao nome (*e.g.* apatita dolomita carbonatito ou olivina calcita carbonatito).

Mitchell & Gittins (2022) ampliam a discussão pela distinção entre carbonatitos e carbótermalitos. Tendo como base definição genética-mineralógica, carbonatitos em sentido amplo (*sensu lato*) são considerados como rochas magmáticas primárias de alta temperatura. Em contrapartida, autores propõem termo carbótermalito para designar rochas de baixa temperatura formadas por fluidos tardios ricos em CO₂. Cada grupo de rocha sendo caracterizado por mineralogia e textura distintiva. Autores recomendam abandono de termos como sovito, alvikito, beforsito e outras variações. Emprego de classificação química é considerado pouco eficaz, uma vez que não reflete necessariamente a mineralogia formadora da rocha. Em última análise, taxonomia com base somente na mineralogia modal da rocha é recomendada.

1.2.2 FOSCORITOS

Foscoritos foram inicialmente definidos por Russel *et al.* (1954) no Complexo de Palabora, África do Sul, para designar rochas formadas essencialmente por olivina, magnetita e apatita. O termo faz referência a empresa Foskor (*Phosphate Development Corporation*) que até o presente explora áreas do complexo. Russel *et al.* (1954) descreve foscoritos como rochas de granulação grossa, formadas por amplas variações na proporção relativa dos minerais e caracterizados por bandamentos magmáticos de forma paralela às margens das intrusões.

Rochas análogas aos foscoritos de Palabora foram descritas em áreas da União Soviética entre as décadas de 60 e 70. Publicações russas nesse período designaram o termo camaforito em acrônimo para **calc**ita, **apat**ita, **mag**netita e **for**sterita. Posteriormente em extenso estudo de ocorrências que constituem a Província de Maymecha-Kotuy na região da Sibéria, Yegorov (1993) assume de forma definitiva a utilização do termo foscorito e propõe o primeiro esquema de classificação.

Série de rochas foscoríticas é reconhecida pela presença de amplas variações modais que resultam em diferentes variedades de tipos petrográficos. Diagrama triangular formado por apatita, olivina e magnetita (**Fig. 1.2A**) reconhece foscoritos *strictu sensu* como termos intermediários entre os três componentes, nelsonitos como variedades pobres em olivina, e fácies monominerálicas como apatitito, forsteritito e magnetitito. Presença de outros minerais primários também é reconhecida, como carbonatos, flogopita, tetraferroflogopita e diopsídio.

A Província de Kola representa importante ocorrência localizada entre porções da Rússia e Finlândia, amplamente revisada por Wall & Zaitsev (2004). Como parte desse volume, Krasnova *et al.* (2004a) sugere nova classificação pela utilização dos minerais principais como prefixos ao termo foscorito, seguindo ordem crescente de abundância (*e.g.* apatita-magnetita foscorito ou olivina-magnetita foscorito). De forma semelhante à classificação por Yegorov (1993), foscoritos aproximadamente monominerálico também podem ser nomeados de acordo com o mineral principal (*e.g.* apatitito). Termos qualificadores são recomendados com objetivo de adicionar informações relevantes. Minerais acessórios podem ser usados como qualificadores para separar fácies em diferentes estágios de evolução, como pela presença de calcita, flogopita e tetraferroflogopita (*e.g.* apatita-magnetita foscorito com tetraferroflogopita).

Em aplicação a essa nomenclatura, Krasnova *et al.* (2004b) descreve foscoritos no Complexo de Kovdor. Tendo em vista a presença de nomes excessivamente longos com três ou mais componentes, Krasnova emprega abreviações com a primeira letra de cada mineral. Nesse sentido, um foscorito típico poderia ser chamado de AFM (*i.e.* apatita, forsterita e magnetita,

respectivamente) ou outras combinações possíveis. Posteriormente variedades em que mineral magnésiano principal é representado pelo diopsídio também são consideradas nessa classificação, como ilustrado pela **Fig. 1.2B**. Apesar de ocorrência ainda mais restrita no registro geológico, foscoritos com diopsídio são reconhecidos como parte dos complexos de Sebyavr (Balaganskaya *et al.*, 2007) e Turiy Mys (Karchevsky & Moutte, 2004) na Província de Kola.

Atualmente a nomenclatura dos foscoritos ainda é alvo de debate, pela dificuldade em estabelecer uma classificação simples que abranja as diferentes variedades litológicas. Alguns autores se utilizam do termo foscorito sem nenhum detalhamento adicional (*e.g.* Palabora; Heinrich, 1970; Eriksson, 1982). Contudo, uma classificação mais específica é necessária se múltiplas variedades estão presentes, aspecto que pode ser comum em ocorrências conhecidas pelo mundo (*e.g.* Kovdor; Krasnova *et al.*, 2004b).

Dentre as diferentes possibilidades de classificação discutidas anteriormente, existem vantagens e limitações inerentes a cada metodologia proposta. Diagrama ternário por Yegorov (1993) tem sido muito utilizado por representar uma forma simples e concisa de classificação, mas apresenta limitação por não englobar variedades ricas em diopsídio, calcita ou flogopita. Por sua vez, metodologia por Krasnova *et al.* (2004a) pode ser utilizada em casos em que ocorre grande variedade de fácies, embora implique na utilização de nomes, por vezes, muito extensos e em uma subdivisão excessiva em tipos petrográficos diferentes.

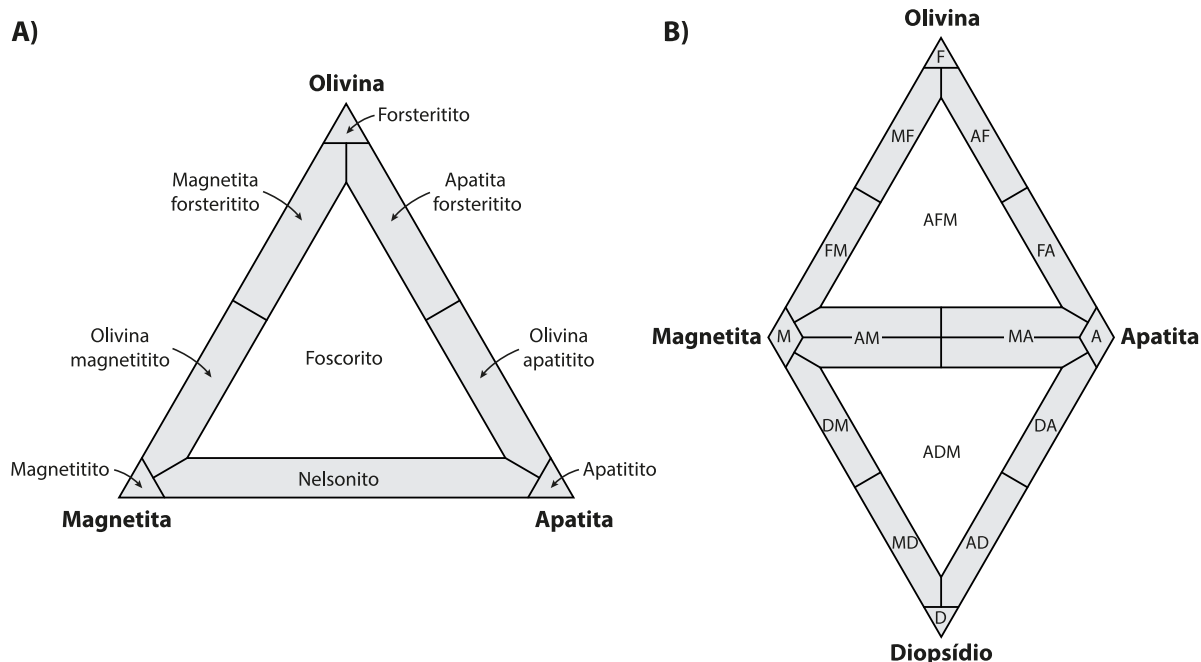


Fig. 1.2 A) Diagrama triangular de classificação formado por magnetita, forsterita e apatita para rochas da série foscorítica segundo Yegorov (1993). B) Classificação ampliada considerando variedades em que mineral magnésiano principal é diopsídio, segundo Krasnova *et al.* (2004a) e Karchevsky & Moutte (2004). Abreviações são empregadas seguindo primeira letra de cada componente mineral, representados por **m**agnetita, **a**patita, **f**orsterita e **d**iopsídio.

Em meados da década de 80, foscoritos foram reconhecidos em complexos alcalinos no Brasil. Dentre as primeiras referências a se utilizarem desse termo, destacam-se estudos nos complexos de Catalão I (Carvalho & Bressan, 1981; Gierth & Baecker, 1986), Araxá (Issa Filho *et al.*, 1984; Silva, 1986) e Anitápolis (Furtado *et al.*, 1986; Furtado, 1989). Nomenclatura por Yegorov (1993) foi particularmente empregada em trabalhos posteriores na região do Alto Paranaíba (Brod *et al.*, 2004; Cordeiro *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2017). Nesses trabalhos, destaca-se distinção entre foscoritos *strictu sensu* portadores de olivina e nelsonitos em que mineral magnesiano predominante é comumente representado por flogopita ou tetraferriflogopita.

Utilização do termo nelsonito é especialmente controversa na literatura para designar variedades de foscoritos sem olivina. Embora nelsonitos tenham sido definidos originalmente como cumulados ricos em apatita e ilmenita em complexos ultramáficos (Le Maitre *et al.*, 2002), o termo se tornou amplamente difundido como jargão em empreendimentos minerais no Alto Paranaíba, pela possibilidade de distinção de forma simples entre variedades sem olivina tipicamente ricas em pirocloro das demais pouco ou não mineralizadas em nióbio. Tal ampliação do conceito original tem sido questionada por agregar imprecisão a uma nomenclatura já consolidada na literatura inerente a associações de gabros e anortositos (Kolker, 1982). Em trabalhos mais recentes (Palmieri *et al.*, 2022), a designação como nelsonito tem sido desaconselhada em preferência ao uso de prefixos qualitativos.

Adaptação da nomenclatura proposta por Krasnova *et al.* (2004a) foi utilizada por Palmieri *et al.* (2022) no Complexo Catalão II. Como alternativa para indicação de todos principais componentes minerais como prefixos, os autores consideram a presença de apatita e magnetita como inerente ao termo foscorito e optam por especificar mineral silicático principal. Através dessa alternativa é possível separar diferentes estágios de evolução pela presença de minerais indicadores. Dessa forma, pode ser feita distinção entre olivina foscorito, flogopita foscorito ou tetraferriflogopita foscorito. Variedades ricas em apatita com magnetita ausente ou vice-versa podem ser designadas, respectivamente, como apatitito ou magnetitito. Nesses casos, prefixos são recomendados quando houver outros minerais em proporções relevantes (*e.g.* flogopita apatitito, olivina magnetitito, flogopita magnetitito, entre outras combinações).

No presente trabalho, foscoritos são considerados como rochas ultramáficas cumuláticas em associação direta com carbonatitos formadas por variações modais de apatita, magnetita, olivina, flogopita, tetraferriflogopita e carbonatos. Em virtude da longa tradição regional no Alto Paranaíba, variedades de rochas ricas em diopsídio, apatita e magnetita serão consideradas como bebedouritos, embora classificação como diopsídio foscorito também seja prevista seguindo recomendações por Krasnova *et al.* (2004a).

1.2.3 BEBEDOURITOS

Bebedourito foi um termo definido originalmente por Tröger (1928) para designar clinopiroxenitos ricos em biotita e perovskita encontrados em exposições na Fazenda Bebedouro, região da Serra do Salitre, Minas Gerais. Devido dificuldade em se encaixar variedades de rochas em complexos alcalinos do Alto Paranaíba nos critérios comumente aceitos para a classificação de rochas ígneas, essa nomenclatura se tornou muito utilizada em publicações subsequentes (Mariano & Marchetto, 1991; Lloyd & Bailey, 1991; Morbidelli *et al.*, 1995). Em evolução a diferentes abordagens de nomenclatura empregadas, atualmente bebedouritos são considerados como uma suíte de rochas ultramáficas cumuláticas formadas por proporções de clinopiroxênio, olivina, flogopita, apatita, magnetita e fases de cálcio e titânio como perovskita, titanita e/ou melanita (**Fig. 1.3**). Minerais acessórios podem incluir também feldspato potássico, anfibólio, calcita, ilmenita, cromita e zirconolita.

Sequências cumuláticas formadas por amplas variações modais no conteúdo de clinopiroxênio, olivina, flogopita, magnetita e perovskita foram inicialmente descritas em Tapira e Salitre I. Nesses complexos, Brigatti *et al.* (1996) e Morbidelli *et al.* (1997) se referem a “bebedouritos” como variedades de rochas compostas por proporções equivalentes de flogopita e clinopiroxênio. Classificação alternativa como “clinopiroxênio flogopitito” ou “flogopita clinopiroxenito” é considerada inadequada pela falsa sugestão da predominância de um mineral em relação ao outro. Outras fácies nessas sequências são determinadas pelos autores como clinopiroxenitos, wehrlitos, dunitos, glimeritos, magnetititos e perovskititos.

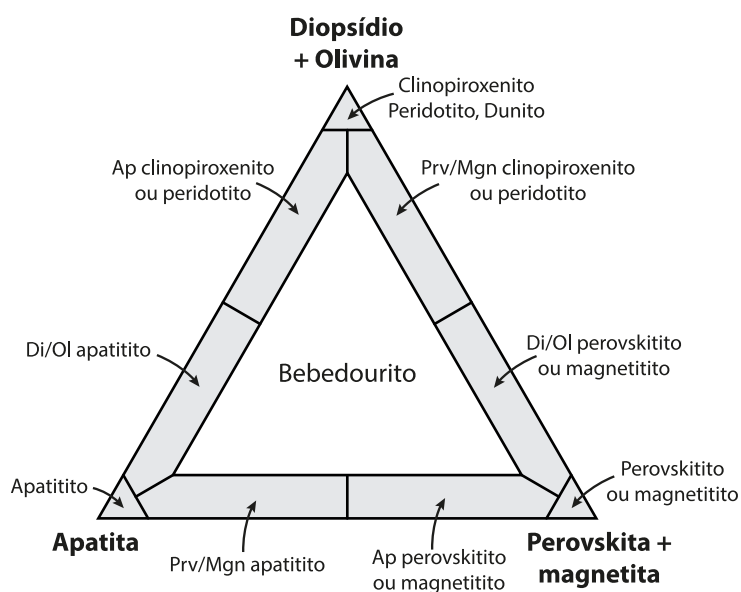


Fig. 1.3 Classificação simplificada das rochas da série bebedourítica (Brod *et al.*, 2004).

Em extenso estudo petrológico, Brod (1999) faz novas considerações a respeito da nomenclatura e mineralogia das unidades que compõem o Complexo de Tapira. O autor se utiliza do termo bebedourito de forma abrangente para designar sequências de rochas cumuláticas cogenéticas. Variações modais são descritas em progressões que ocorrem na escala de metros a centímetros. Nesse sentido, não é feita distinção entre cada tipo de fácies presente (*e.g.* clinopiroxenito, magnetitito, perovskitito ou outras combinações de minerais possíveis), como em trabalhos anteriores. Mas apenas duas unidades cogenéticas são reconhecidas (*i.e.* B1 e B2) com base em associações geoquímicas e em relações de corte entre as intrusões. Forma de classificação que seguiu sendo adotada em série de trabalhos posteriores, como Brod *et al.* (2000, 2004, 2005).

Em evolução a essa nomenclatura, Barbosa *et al.* (2012) se utiliza de minerais chave na paragênese para distinção entre subtipos de bebedouritos. De forma similar a Brod (1999), a autora reconhece a presença de duas unidades de bebedouritos em Salitre I. Dentre cada unidade, subtipos são determinados com base em minerais que, embora possam ser acessórios em alguns casos, permitem a separação entre fácies em estágios de evolução distintos. Variedades podem ser classificadas pela utilização de prefixos como **perovskita-**, **titanita-** e **melanita-bebedourito**, ou mesmo se utilizando da presença de outros minerais como olivina. Essa estratégia é também utilizada por Mitchell (1997) e Mitchell & Bergman (1991) para descrever suítes de rochas que não se enquadram nos critérios tradicionais de classificação pela IUGS e permiti uma classificação simples capaz de conciliar tanto aspectos mineralógicos como genéticos.

A complexidade em torno da nomenclatura para essas rochas está associada a uma série de limitações particulares. Minerais que não são normalmente levados em conta como critério de classificação para rochas ígneas ocorrem, muitas vezes, como fases essenciais. Como demonstrado em estudos nos complexos de Tapira e Salitre I (Brod, 1999; Barbosa *et al.*, 2012), a proporção modal de apatita, flogopita e perovskita excede a de clinopiroxênio em 65% das amostras estudadas. Simplificação pela classificação como peridotitos levando em conta apenas proporção de clinopiroxênio e olivina (*i.e.* clinopiroxenito, wehrlito ou dunito) representa uma aproximação grosseira e incapaz de comportar variedades de fácies presentes.

A pouca abrangência no registro geológico é outro fator complicador, sendo as principais ocorrências descritas em nível regional na Província do Alto Paranaíba. Como efeito, número bastante limitado de publicações em periódicos de alcance internacional dedicaram-se em estudar de fato essas sequências cumuláticas (Brigatti *et al.*, 1996; Morbidelli *et al.*, 1997; Brigatti *et al.*, 2004; Brod *et al.*, 2005; Barbosa *et al.*, 2012). Embora outras ocorrências potencialmente similares tenham sido reportadas em outros complexos alcalinos, como rochas ultramáficas ricas em apatita

e flogopita em Palabora (Eriksson, 1982), e “dunitos” ricos em perovskita e magnetita em Sebyav (Balaganskaya *et al.*, 2007).

1.2.4 LAMPRÓFIROS

Lamprófiros são um grupo diverso de rochas alcalinas, ricas em H₂O e CO₂, tipicamente hipoabissais (Rock, 1991; Mitchell, 1995; Wooley *et al.*, 1996). Como características distintivas a outros grupos de rochas potencialmente semelhantes como kimberlitos e lamproítos, Le Maitre *et al.* (2002) apontam aspectos como o alto conteúdo em K₂O, Na₂O, S, P₂O₅ e Ba, e forma de intrusão como diques e *sills*. Os lamprófiros são meso- a melanocráticos ou, mais raramente, holomelanocráticos. A textura é inequigranular com macrocristais de biotita e/ou anfibólio e, em alguns casos, olivina e clinopiroxênio. Em geral, a matriz é composta pela mesma mineralogia, mas outros minerais como feldspatos e/ou feldspatóides podem estar presentes. Calcita e zeólitas também são possíveis como fases primárias. Classificação com base em recomendações pela IUGS segue proporção entre os minerais principais, como indicado pela **Tab. 1.2**.

Em revisão a classificação vigente, Tappe *et al.* (2005) propõem modificações para inclusão de variedades ultramáficas. Lamprófiros ultramáficos (M > 90%) são caracterizados pela textura inequigranular com macrocristais de olivina, flogopita e, por vezes, clinopiroxênio. Diferenciam-se como **alnöito** as variedades portadoras de melilita, **aillikito** pela presença de carbonato primário na matriz, e **damtjernito** pela presença de nefelina e/ou feldspato alcalino. Critérios de distinção com outros tipos de rochas são baseados pela determinação da afinidade petrogenética, tendo-se em vista a paragênese ou, em casos mais complexos, composição das fases minerais. Em aspecto geral, os lamprófiros ultramáficos podem se distinguir de lamproítos pela ocorrência de carbonatos e de kimberlitos por fenocristais de clinopiroxênio na matriz. Maiores detalhes sobre composição mineral específica para cada tipo petrogenético são apresentados por Tappe *et al.* (2005, 2006)

Classificação de diques ultramáficos tardios na Província Alto Paranaíba constitui objeto de debate entre os autores. Em estudo pioneiro, Machado Júnior (1991) e Melo (1999) descrevem em detalhe diques ultramáficos no Complexo Catalão II e se utilizam de classificação como lamprófiros. No entanto, Gibson *et al.* (1995) redefinem essas ocorrências como flogopita picritos e ampliam utilização do termo para diques similares encontrados nos demais complexos alcalinos da província. Os autores apontam que as características petrográficas observadas nessas rochas não estariam em conformidade com nenhuma nomenclatura previamente estabelecida. A alternativa adotada foi pelo estabelecimento de um paralelo com termo flogopita picrito, tendo em vista o elevado conteúdo modal em olivina e flogopita. Perspectiva de classificação que foi seguida em boa parte dos trabalhos posteriores na província (Brod *et al.*, 2000, 2013; Guarino *et al.*, 2013).

Embora terminologia como flogopita picrito tenha se tornado amplamente difundida em nível regional após Gibson *et al.* (1995), utilização do termo é controversa pela associação direta com picritos “*stricto sensu*”. De acordo com Le Maitre *et al.* (2005), definição de picrito compreende variedades de basaltos ricos em olivina e clinopiroxênio, com elevado conteúdo em MgO. Critérios químicos de classificação estabelecem faixas composicionais restritivas como $\text{MgO} > 12\%$, $52\% > \text{SiO}_2 > 30\%$ e $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) < 3\%$.

Nesse sentido, rochas conhecidas como “picritos” na Província do Alto Paranaíba divergem profundamente da definição original ao termo, tanto em aspectos petrográficos como composicionais (*i.e.* química mineral e rocha total). Os diques consistem em macrocristais de olivina e flogopita em uma matriz rica em flogopita e carbonatos. Minerais acessórios são perovskita, espinélios, apatita, clinopiroxênio e melanita. Composição química, como reflexo dessa paragênese mineral, é marcada pela insaturação em sílica (24-38 wt.% SiO_2), baixo alumínio (< 5.4 wt.% Al_2O_3), alto conteúdo em álcalis (1.4-6.6 wt.% K_2O , 0.1-1.6 wt.% Na_2O) e voláteis (5-22 wt.% LOI).

Após revisão da nomenclatura de lamprófiros para inclusão de variedades ultramáficas, tais características minerais e químicas se enquadram dentro dos critérios estabelecidos por Tappe *et al.* (2005) e, não obstante, recomendações por Le Maitre *et al.* (2002) e Mitchell (1995). Isto é, são intrusões hipoabissais (*e.g.* diques e *sills*) com típica textura inequigranular, apresentam alto conteúdo em álcalis e voláteis, e ocorrem como último pulso magmático cortando demais rochas. Como destacado por Ruiz *et al.* (2022), o termo aillikito é o mais adequado dentro das possibilidades de classificação entre lamprófiros, tendo em vista proporção de olivina, flogopita e carbonatos.

Tab. 1.2 Classificação de lamprófiros baseada na proporção entre os minerais principais. Modificado de Le Maitre *et al.* (2002). Abreviações: Or – ortoclásio, Pl – plagioclásio, Fsp – feldspato e Foid – feldspatóide.

Minerais Leucocráticos		Minerais Máficos		
Fedspatos	Feldspatóides	biotita > hornblenda, ± augita diopsídica, ± olivina	hornblenda, augita diopsídica, ± olivina	anfibólio marrom, Ti-augita, olivina, biotita
Or > Pl	-	minete	vogesito	-
Pl > Or	-	kersantito	spessartito	-
Or > Pl	Fsp > Foid	-	-	sanaito
Pl > Or	Fsp > Foid	-	-	camptonito
-	vidro ou Foid	-	-	monchiquito

1.3 COMPLEXOS ALCALINO-CARBONATÍTICOS

Carbonatitos representam um grupo diverso de rochas ígneas com múltiplas origens e que envolvem complexas relações entre diferentes tipos de mecanismos de diferenciação magmática. Carbonatitos magmáticos (*stricto sensu*) podem ocorrer como corpos isolados ou em associação temporal e espacial com certos tipos de rochas silicáticas, especialmente de composição alcalina (Bell *et al.*, 1998; Mitchell, 2005; Woolley & Kjarsgaard, 2008a).

1.3.1 ASSOCIAÇÕES PETROGENÉTICAS

As associações mais comuns que acompanham complexos carbonatíticos são formadas por rochas de afinidades nefelinítica (nefelinito, ijolito, fonolito e nefelina sienito), rochas ultramáficas (dunito, peridotito e piroxenito), rochas félsicas ricas em feldspato (traquito, sienito, quartzo-traquito e quartzo sienito) e rochas portadoras de melilita (melilitito, nefelina-melilitito e melilitolito), como ilustrado pela **Fig. 1.4** (Woolley & Kjarsgaard, 2008b).

Apesar da associação com rochas silicáticas ser considerada em muitas ocorrências como reflexo de vínculo genético na história evolutiva dos magmas de um mesmo complexo plutônico ou vulcânico (Wyllie, 1989; Beccaluva *et al.*, 1992), apenas a justaposição espacial não evidencia necessariamente consanguinidade entre as rochas (Gittins & Harmer, 2003). Magma carbonatíticos podem ser também derivados diretamente do manto e não apresentarem vínculo claro com as rochas silicáticas que os acompanham, exceto pela ascensão desses magmas na crosta por um mesmo conduto magmático ou zona de fraqueza (Srivastava *et al.*, 2005; Chmyz *et al.*, 2019).

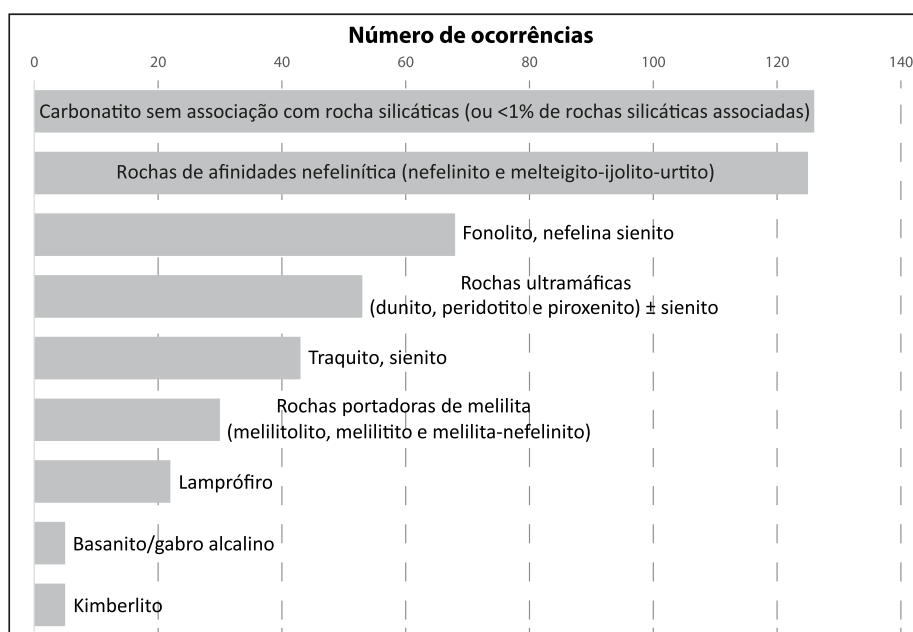


Fig. 1.4 Ocorrências de carbonatitos magmáticos subdivididos em associações paragenéticas. Modificado de Woolley & Kjarsgaard (2008b).

Em casos mais raros, outra associação petrogenética de especial interesse econômico é representada pelos foscoritos (Russell *et al.*, 1954; Yegorov, 1993; Krasnova *et al.*, 2004a). Essas rochas estão relacionadas a importantes depósitos de nióbio e fosfato em Araxá, Catalão I e II no Brasil (Cordeiro *et al.*, 2010; Mitchell, 2015), fosfato e magnetita em Kovdor na Rússia (Rudashevsky *et al.*, 2004), e cobre, fosfato e vermiculita em Palabora na África do Sul (Eriksson, 1982). Na maior parte das localidades conhecidas os foscoritos ocorrem como parte de complexos plutônicos em associação direta com carbonatitos e frequentemente com rochas ultramáficas cumuláticas, como dunitos e clinopiroxenitos (Yegorov, 1993; Krasnova *et al.*, 2004b).

Woolley & Kjarsgaard (2008b) reconhecem 527 ocorrências de carbonatitos no mundo, dos quais 403 são considerados carbonatitos *sensu strictu* de origem magmática, enquanto as demais ocorrências representam carbonatitos carbohidrotermais (*i.e.* 74) ou localidades com poucas informações disponíveis (*i.e.* 50). Em contraste, foscoritos são descritos em apenas 27 ocorrências em que se tenha algum tipo de conhecimento científico publicado na literatura (**Tab. 1.3**). Dessas ocorrências, 21 são reportadas por Krasnova *et al.* (2004a) em seu trabalho de revisão sobre rochas foscoríticas e outras 6 são complexos brasileiros que vêm sendo melhor estudados nos últimos anos (Scheibe *et al.*, 2005; Cordeiro *et al.*, 2010; Grasso, 2010; Barbosa *et al.*, 2012; Palmieri *et al.*, 2022).

Em boa parte das localidades, os foscoritos ocorrem como parte de complexos plutônicos alcalino-carbonatíticos em grandes províncias ígneas, como a Província de Kola entre a Rússia e a Finlândia (Wall & Zaitsev, 2004), Maymecha-Kotuy na região da Sibéria na Rússia (Yegorov, 1993) e Alto Paranaíba no Brasil (Gibson *et al.*, 1995). Embora também existem casos de complexos isolados, sem relação com outras rochas ígneas de uma província, como é o caso de Palabora na África do Sul (Eriksson, 1982).

Tab. 1.3 Principais complexos carbonatíticos com ocorrência de foscoritos. Adaptado de Krasnova *et al.* (2004a).

Província	Complexo	Principais tipos litológicos	Idade (Ma)	Referências
Província do Alto Paranaíba (Brasil)	Araxá	Bebedourito, flogopitito, foscorito, carbonatito e lamprófiro	97-77 ⁽¹⁾ (K-Ar)	Issa Filho <i>et al.</i> (1984), Traversa <i>et al.</i> (2001)
	Catalão I	Dunito, bebedourito, flogopitito, foscorito, carbonatito e lamprófiro	85 ⁽¹⁾ (K-Ar)	Cordeiro <i>et al.</i> (2010)
	Catalão II	Bebedourito, foscorito, carbonatito, sienito e lamprófiro	83 ± 4 ⁽²⁾ (U-Pb)	Machado Júnior (1991), Palmieri <i>et al.</i> (2022)
	Tapira	Dunito, wehrlito, bebedourito, foscorito, carbonatito, sienito e lamprófiro	87-71 ⁽¹⁾ (K-Ar)	Brod (1999)
	Salitre	Bebedourito, foscorito, carbonatito e sienito	86-82 ⁽¹⁾ (K-Ar)	Barbora <i>et al.</i> (2012, 2020)
	Serra Negra	Dunito, bebedourito, foscorito, carbonatito, traquito e lamprófiro	~83 ⁽¹⁾ (K-Ar)	Grasso (2010)
-	Anitápolis (Brasil)	Clinopiroxenito, biotitito, ijolito, nefelina sienito, foscorito, carbonatito, nefelinito, fonolito e lamprófiro	131-132 ⁽¹⁾ (K-Ar)	Scheibe <i>et al.</i> (2005)
Província de Kola (Rússia, Finlândia)	Kovdor (Rússia)	Dunito, clinopiroxenito, turjaito, ijolito, foscorito e carbonatito	380-378 ⁽³⁾ (U-Pb)	Krasnova (2001)
	Turiy Mys (Rússia)	Clinopiroxenito, melteigito, turjaito, ijolito, foscorito e carbonatito	376 ± 2 ⁽⁴⁾ (U-Pb)	Bell & Dunworth (1996)
	Vuoriyarvi (Rússia)	Dunito, clinopiroxenito, ijolito, melteigito, foscorito, e carbonatito	368-361 ⁽³⁾ (U-Pb)	Karchevsky & Moutte, (2004)
	Seblyavr (Rússia)	Clinopiroxenito, ijolito, melteigito, foscorito e carbonatito	382 ± 5 ⁽⁴⁾ (²³² Th- ²⁰⁸ Pb)	Balaganskaya <i>et al.</i> (2007)
	Sokli (Finlândia)	Foscorito, carbonatito e clinopiroxenito metassomatizado	380 ± 7 ⁽⁴⁾ (²³² Th- ²⁰⁸ Pb)	Vartiainen (1980)
-	Phalaborwa (África do Sul)	Clinopiroxenito, flogopita clinopiroxenito pegmatóide, foscorito e carbonatito	~2060 ⁽⁵⁾ (U-Pb)	Eriksson (1982)
	Schiel (África do Sul)	Clinopiroxenito, sienito, foscorito e carbonatito	2051 ± 6 ⁽⁶⁾ (U-Pb)	Lubala <i>et al.</i> (1994)

¹ Sonoki & Garda (1988); ² Guarino *et al.* (2013); ³ Arzamastseva & Wu (2014); ⁴ Rukhlov & Bell (2010); ⁵ Wu *et al.* (2011); ⁶ Laurent & Zeh (2015).

Província	Complexo	Principais tipos litológicos	Idade (Ma)	Referências
Província Maymecha-Kotuy (Rússia)	Guli	Dunito, clinopiroxenito, melilitolito, melanefelinito, jacupiranguito, melteigito, foscorito e carbonatito	250 ± 9 ⁽⁷⁾ (U-Pb)	Simonov <i>et al.</i> (2016)
	Kugda	Dunito, melteigito, ijolito, foscorito e carbonatito	257 ± 6 ⁽⁸⁾ (U-Pb)	Kogarko (2018)
	Essei	Melteigito, ijolito, foscorito e carbonatito	-	
	Dalbykha	Melteigito, ijolito, foscorito e carbonatito	-	
	Magan	Dunito, melteigito, ijolito, nefelina sienito, foscorito e carbonatito	-	Yegorov (1993)
	Yraas	Melteigito, ijolito, foscorito e carbonatito	-	
	Romanikha	Melteigito, ijolito, foscorito e carbonatito	-	
-	Arbarastakh (Rússia)	Clinopiroxenito, nefelina clinopiroxenito, carbonatito, sienito e foscorito	$720-690$ ⁽⁹⁾ (K-Ar)	Prokopyev <i>et al.</i> (2021)
-	Dubravinsky (Rússia)	Piroxenito alcalino, carbonatito, foscorito e sienito alcalino	2080 ± 13 ⁽¹⁰⁾ (U-Pb)	Savko <i>et al.</i> (2023)
-	Barchinskiy (Cazaquistão)	Clinopiroxenito e foscorito	-	Kogarko (1995)
-	Panda Hill (Tanzania)	Aglomerados feldspáticos e brechas, foscorito e carbonatito	113 ± 6 ⁽¹¹⁾ (K-Ar)	Basu & Mayila (1986)
-	Dorowa (Zimbabwe)	Dunito, ijolito, sienito, foscorito e carbonatito	-	Johnson (1961)
-	Bukusu (Uganda)	Dunito, clinopiroxenito, ijolito, nefelina sienito, foscorito e carbonatito	-	Woolley (2001)
-	Nemegosenda Lake (Canadá)	Nefelina sienito, malignito, foscorito e carbonatito	-	Philpotts (1967)

⁷ Ghobadi *et al.* (2018); ⁸ Anosova *et al.* (2019); ⁹ Glagolev *et al.* (1974); ¹⁰ Albekov *et al.* (2017); ¹¹ Legler *et al.* (2015).

2.1 COMPLEXO ALCALINO-CARBONATÍTICO CATALÃO II

O Complexo Catalão II na porção setentrional da Província Alto Paranaíba é constituído por sucessivos pulsos magmáticos que compreendem séries de bebedouritos, foscoritos, carbonatitos e sienitos. O maciço apresenta forma bicêntrica com aproximadamente 12 km² em área e idade de intrusão estimada em 83 Ma (**Tab. 2.1**). O embasamento representado pelo Grupo Araxá é formado por rochas metassedimentares, quartzo-mica xistos e mica quartzitos com intercalações de filitos, e metavulcânicas em menor proporção, predominantemente anfíbolitos máficos (Machado Júnior, 1991).

Intenso metassomatismo das rochas encaixantes no entorno do complexo é marcado pela substituição das paragêneses metamórficas por assembleias metassomáticas. A percolação de fluidos metassomáticos promove o enriquecimento em álcalis levando a formação de fenitos com proporções variáveis de mica, feldspato potássico e anfíbólios sódicos. Feições como brechas de fragmentação formadas sobre quartzitos na borda da intrusão e venulações carbo-hidrotermais são comuns (Machado Júnior, 1991).

Fenitos resistentes ao intemperismo nas bordas da intrusão favorecem o desenvolvimento de estruturas dômicas em que se desenvolvem espessos perfis de intemperismo em profundidades de até 250 m, como Catalão I e Serra Negra (Carvalho, 1974; Grasso, 2010). Entretanto, em Catalão II o desenvolvimento dessa feição ocorre de forma menos pronunciada. A área é marcada por uma elevação topográfica discreta com relevo suave a ondulado e altitudes máximas de até 950 m. Apesar de menos espesso em comparação aos demais complexos, o perfil de intemperismo alcança profundidades entre 60 e 100 m (Palmieri, 2011). Exposições de rochas frescas são restritas a afloramentos no *open pit* da Mina Boa Vista.

Tab. 2.1 Compilação de idades obtidas em rochas do Complexo Catalão II.

Litologia	Idade (Ma)	Análise	Método	Referência
Calcita carbonatito	82.0 ± 1.3	Rb-Sr	Isócrona utilizando análises em concentrados de flogopita	Machado Júnior (1992)
Calcita carbonatito Lamprófiro ultramáfico Álcali-feldspato sienito	83.4 ± 0.9	Rb-Sr	Isócrona utilizando análises de rocha total e de concentrados minerais (calcita e flogopita)	
	82 ± 3			
Lamprófiro ultramáfico (i.e. flogopita picrito)	83 ± 4 90 ± 4	U-Pb	Análises <i>in situ</i> em cristais de perovskita (SIMS)	Guarino <i>et al.</i> (2013)

Uma ampla diversidade de rochas constitui Catalão II em relações de contato complexas. Rochas derivadas de um mesmo pulso magmático podem apresentar ampla variação modal dos constituintes principais, com a formação de fácies distintas em relações de contato gradacionais. Por sua vez, pulsos magmáticos posteriores apresentam relações de contato abruptas na forma de diques e veios.

A relação intrincada entre as litologias e o autometassomatismo promovido por diferentes estágios de magmatismo são fatores que dificultam o mapeamento no complexo. A representação em um modelo litológico é feita pela indicação de zonas de predominância (**Fig. 2.1**), tendo como referência informações obtidas por campanhas de sondagem e malhas de geoquímica de solo.

Dois domínios podem ser reconhecidos por mudanças nos tipos de associações de rochas e na forma de intrusão predominante (Machado Júnior, 1991; Palmieri *et al.*, 2022). Em Catalão II Sul, enxames de diques e veios são intrusivos em rochas do embasamento fenitizadas. Catalão II Norte compreende uma coalescência de intrusões em forma de *pipe*. Diques e veios tardios cortam rochas mais jovens nesse domínio. Diques e pequenos *pipes* de olivina aillikito são a expressão magmática final no complexo e cortam toda a área.

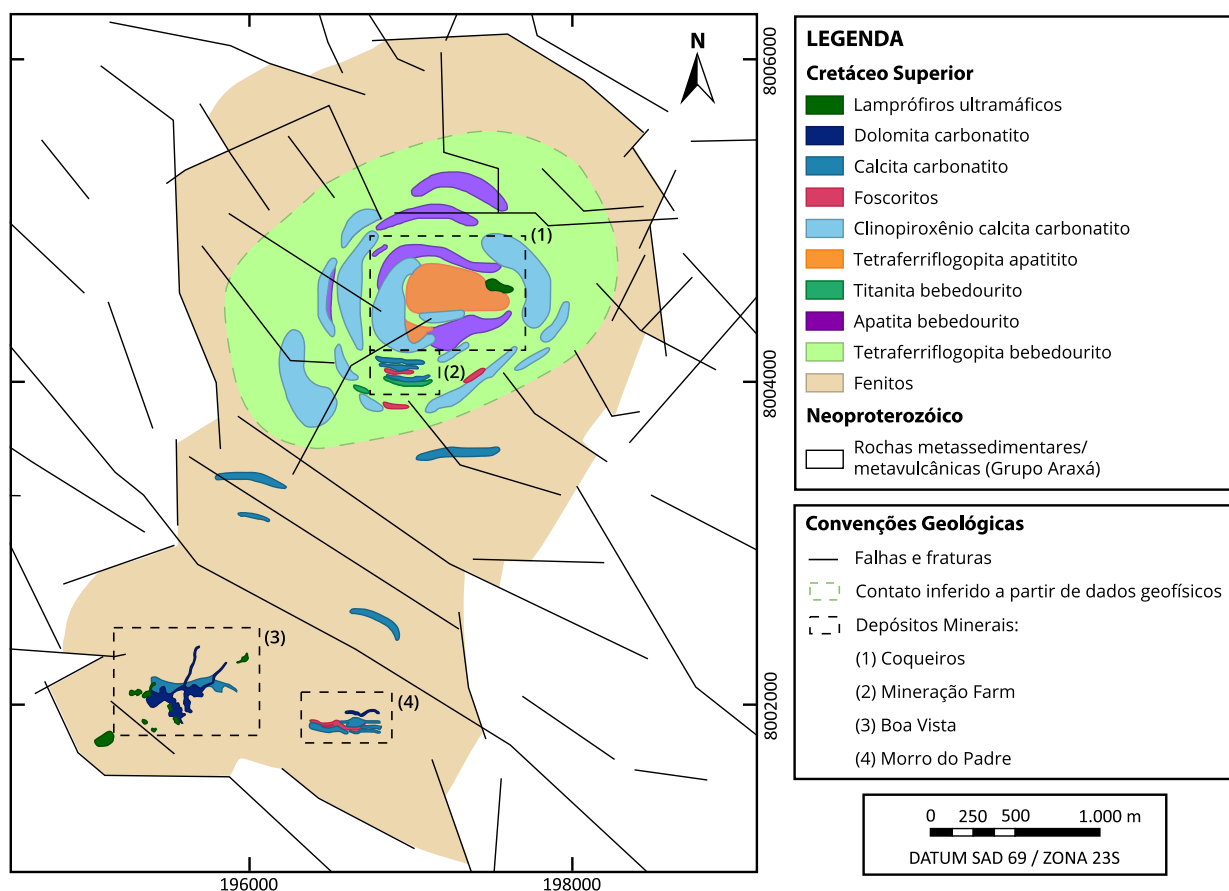


Fig. 2.1 Modelo litológico do Complexo Catalão II. Adaptado de Palmieri (2011) e Ramos (2021).

A relação de temporalidade entre estágios intrusivos pode ser indicada por fatores como o tipo de contato predominante (*i.e.* gradacional ou intrusivo) e pelas relações de corte entre unidades de rochas. Dessa forma, com base em características petrográficas, mineralógicas e relações de contato, o quadro ilustrado pela **Tab. 2.2** resume os principais estágios intrusivos, litologias e respectivas assembleias minerais identificadas neste trabalho para o complexo Catalão II.

2.1.2 CATALÃO II SUL

O domínio sul compreende um complexo sistema de intrusões que variam em termos de dimensão e tipos de rochas. Dique e veios descontínuos formam um *stockwork* sobre encaixantes fenitizadas do Grupo Araxá. Pequenos *stocks* e *plugs* com algumas dezenas de metros ocorrem em menor proporção. As principais litologias são representadas por foscoritos associados com calcita carbonatito, dolomita carbonatito e diques de olivina aillikito.

Estruturas prévias do embasamento são controles importantes na colocação dos magmas. Diques são preferencialmente dispostos em direções de acordo com planos estruturais como fraturas e falhas. Propriedades como a baixa viscosidade (*i.e.* 10^2 a 10^3 Pa.S; Wolff, 1994) e o alto conteúdo de voláteis (*i.e.* $\text{CO}_2 \sim 30\text{-}40$ wt.%; Le Bas, 1987) em magmas carbonatíticos permitem fácil percolação e preenchimento de zonas de fraqueza prévias no embasamento. Relação bem ilustrada em porções da Mina Boa Vista (**Fig. 2.2**) em que populações de diques apresentam direções predominantes em WNW-ESE e NE-SW.

Localmente, concentrações de magma formam pequenos *stocks*. Intrusões mais espessas como *stocks* são caracterizadas por acamadamentos horizontais, em intercalações entre calcita carbonatito e foscoritos. Em algumas porções, *stocks* com espessuras de até 140 m são descritos ocorrendo em maior frequência e volume com o aumento progressivo da profundidade (Palmieri *et al.*, 2022).

Bebedouritos ocorrem de forma bastante restrita e, em geral, como xenólitos em calcita carbonatito. Dentre os litotopos observados, predominam fácies similares ao bebedourito B1 no domínio norte. Intenso metassomatismo no contato desses xenólitos com o carbonatito é marcado pela formação de tetraferriflogopita e anfibólio secundários.

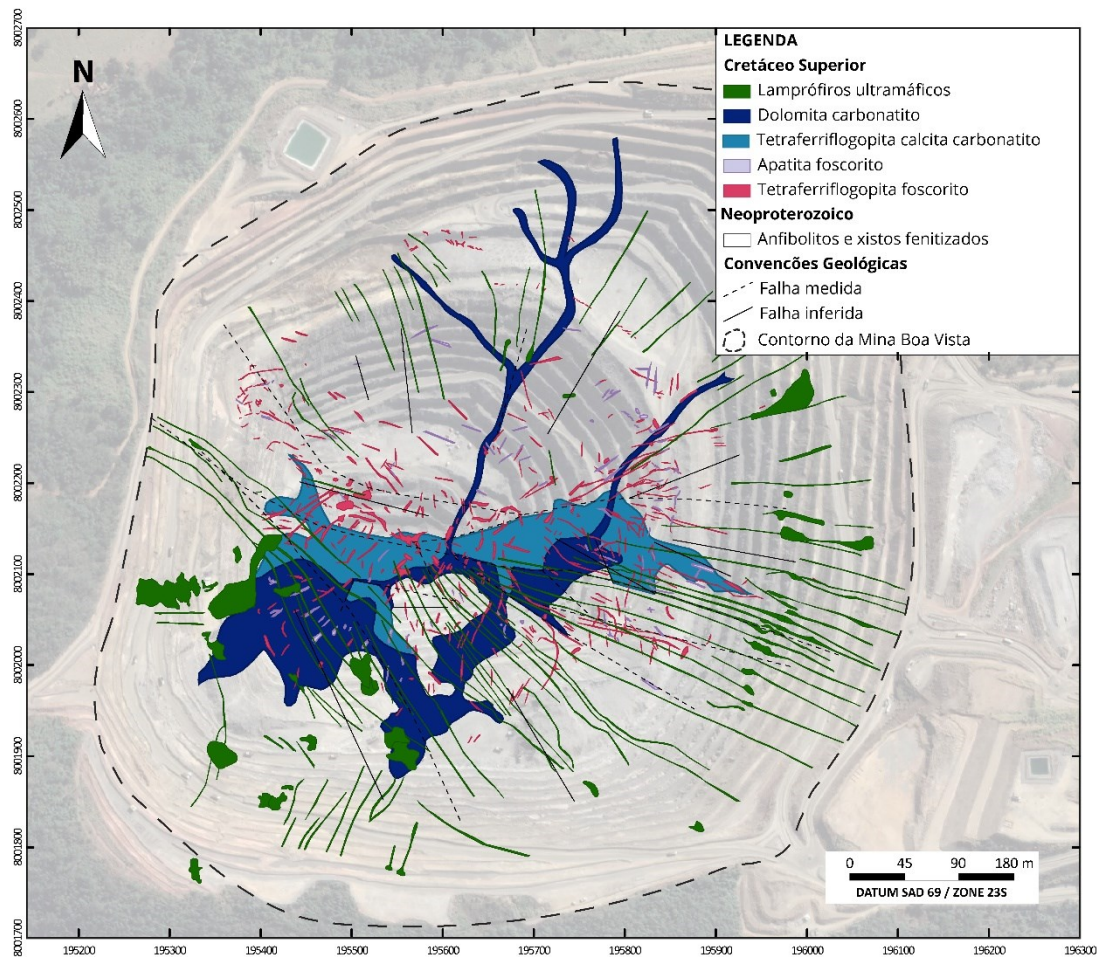


Fig. 2.2 Mapa geológico da Mina Boa Vista no Complexo Catalão II. Adpatado de Ramos (2021).

2.1.1 CATALÃO II NORTE

O domínio norte constitui uma intrusão circular com aproximadamente 5,5 km² que compreende intercalações entre sequências de bebedouritos e calcita carbonatitos. Pelo menos três estágios de bebedouritos são reconhecidos, sendo os dois últimos estágios de bebedouritos associados com calcita carbonatitos por meio de contatos gradacionais. Séries de diques e veios tardios são intrusivos sobre esses estágios temporalmente mais precoces no complexo. Foscoritos em associação com calcita carbonatito, e dolomita carbonatito são as principais associações tardias. Diques subordinados de álcali-feldspato sienito e olivina aillikito são os últimos estágios intrusivos.

A representação em mapa entre os tipos de bebedouritos e calcita carbonatito é um especial desafio técnico pela alta variabilidade e total ausência de afloramentos. Em um único furo de sondagem é possível encontrar todas as litologias descritas. No entanto, zonas de predominância de determinados tipos podem ser reconhecidas em uma escala mais ampla e, dessa forma, permitir a elaboração de um modelo litológico (Fig. 2.1).

Tendo em vista modelo proposto por Palmieri (2011), estrutura observada indica uma configuração concentricamente zonada entre as intrusões. O primeiro estágio intrusivo é formado pelo tetraferriflogopita bebedourito que ocorre predominantemente na porção mais externa ao *pipe* e corresponde a principal litologia em volume no domínio norte. Em direção ao centro, ocorrem intrusões de apatita bebedourito e diopsídio calcita carbonatito. Por sua vez, na porção central do *pipe* predomina o tetraferriflogopita apatitito. O apatita bebedourito, tetraferriflogopita apatitito e fácies temporalmente mais precoces de diopsídio calcita carbonatito formam o segundo estágio e ocorrem associados por relações de contato predominantemente gradacionais.

O terceiro estágio intrusivo é formado por titanita bebedouritos pareados com aegirina-augita calcita carbonatito. Os titanita bebedouritos e calcita carbonatito são marcados pela presença de aegirina-augita e alta proporção em titanita. Ambas litologias ocorrem como pequenos *stocks*, *plugs* e diques com poucos metros de dimensão. Não foi possível a diferenciação em escala mapeável entre os tipos reconhecidos de calcita carbonatito com clinopiroxênio. Dessa forma, diopsídio calcita carbonatito e aegirina-augita calcita carbonatito são agrupados como uma mesma unidade denominada como clinopiroxênio calcita carbonatitos no mapa.

Séries de diques e veios são intrusivos sobre bebedouritos e carbonatitos mais jovens. Dentre principais tipos de diques, se destacam foscoritos pareados com tetraferriflogopita calcita carbonatito. Membros mais tardios nesse estágio apresentam pirocloro de forma característica. Diques ocorrem de forma aleatória por todo o domínio, mas uma área de maior concentração se destaca na porção sudoeste do *pipe*.

Demais estágios intrusivos são marcados por dolomita carbonatito, álcali-feldspato sienito e olivina aillikito. O dolomita carbonatito representa último evento carbonatítico no complexo e apresenta ampla distribuição por toda área. Álcali-feldspato sienito ocorre como diques subordinados, sendo observado apenas de forma localizada em alguns furos. O olivina aillikito forma diques e veios com ampla distribuição e, por vezes, como pequenos *plugs*.

Halos de metassomatismo sobre os bebedouritos são marcados pela interação com diques e veios tardios. Formação de tetraferriflogopita tardi-magmática em bebedouritos ocorre sobrepondo a trama original, principalmente no contato com o dolomita carbonatito. Alteração de rochas ultramáficas em flogopititos metassômáticos apresenta aspecto similar com descrito por Carvalho (1974) e Araújo (1996) no Complexo de Catalão I, porém de forma mais restrita às mediações dos contatos com diques posteriores. Nesse sentido, em contrapartida com Catalão I em que o metassomatismo é amplamente pervasivo, bebedouritos em Catalão II são pouco alterados por processos tardi- a pós-magmáticos.

Tab. 2.2 Paragênese mineral para as principais litologias magmáticas no Complexo Alcalino-Carbonatítico Catalão II destacando os respectivos estágios intrusivos definidos por relação de corte.

Estágios Intrusivos	Classificação	Assembleia magmática		Assembleia tardi- a pós-magmática
		Principal	Acessória	
VII	Olivina aillikito	Phl + Cal + Ol	Spl + Prv + Ap + Tfphl ± Grt ± Cpx	Srp + Cb*
VI	Álcali-feldspato sienito	Or + Bt + Cal	Zrn + Ap ± Ilm ± Dly	Cb*
V (ETR-Ba-Nióbio)	Ferro-dolomita carbonatito	Fe-Dol + Dol + Brt + Str	Cbc + Qq + Anc + Py + Gn ± Pcl ± Rip ± Ant	Qtz
	Dolomita carbonatito	Dol + Cal + Nst	Brt + Bcal + Str + Pyh + Py ± Pcl ± Ant ± Cbc ± Qq ± Anc	Qtz
IV (Nióbio-Fosfato)	Tetraferriflogopita calcita carbonatito	Cal + Tfphl + Ap + Mag	Pcl + Pyh + Ilm + Dol + Brt + Str ± Bcal ± Nst	Cb* ± Py
	Apatita foscorito	Ap + Mag	Cal + Pcl + Ilm ± Tfphl ± Ol ± Ccp ± Dol ± Brt	Cb* ± Py ± Srp ± Chu
	Tetraferriflogopita foscorito	Tfphl + Mag + Ap	Cal + Pcl + Ilm + Pyh ± Ol ± Ccp ± Bn ± Dol ± Brt	Cb* ± Py ± Srp ± Chu
	Olivina foscorito	Ap + Ol + Mag	Tfphl + Pyh + Cal ± Zrn ± Pcl ± Ccp ± Bn	Srp ± Chu ± Cb* ± Py
III (Fosfato)	Aegirina-augita calcita carbonatito	Cal + Cpx + Tfphl	Ap + Ttn ± Zrn ± Wad	Amp
	Titanita bebedourito	Cpx + Ap + Tfphl + Ttn	Cal	Amp ± Py
II (Fosfato)	Diopsídio calcita carbonatito	Cal + Tfphl + Cpx	Mag + Ap + Ttn ± Phl ± Zrn ± Pyh ± Ccp ± Bn	Ilm ± Amp ± Py
	Tetraferriflogopita apatitito	Ap + Tfphl + Mag	Cal + Cpx + Pyh ± Zrn ± Ccp ± Bn	Amp + Tfphl* ± Py
	Apatita bebedourito	Cpx + Ap + Tfphl + Mag	Ttn + Zrn ± Phl ± Cal ± Pyh ± Ccp ± Bn	Amp + Tfphl* + Ilm ± Py
I (Fosfato)	Tetraferriflogopita bebedourito	Cpx + Tfphl + Ap	Ttn ± Cal ± Phl ± Or ± Zrc	Amp + Tfphl* ± Ep

Abreviações: Anc – ancyllita, Ank – ankerita, Ant – anatásio, Amp – anfibólio, Ap – apatita, Bcal – baritocalcita, Bn – bornita, Brt – barita, Bt – biotita, Cal – calcita, Cb – carbonatos indiferenciados, Cbc – carbocernaita, Ccp – calcopirita, Cpx – clinopiroxênio, Chu – clinohumita, Dly – dalyita, Dol – dolomita, Fe-Dol – ferro-dolomita, Grt – granada, Ilm – ilmenita, Mag – magnetita, Nst – norsethita, Ol – olivina, Or – ortoclásio, Phl – Flogopita, Prv – perovskita, Py – pirita, Pyh – pirrotita, Qq – qaqarssukita, Qtz – quartzo, Rip – rippita, Srp – grupo da serpentina, Str – estroncianita, Spl – grupo do espinélio, Tfphl – tetraferriflogopita, Ttn – titanita, Wad – wadeíta, Zrc – zirconolita, Zrn – zircão (Warr, 2021). *Segunda geração de minerais derivados a partir de processos tardi- a pós-magmáticos com base em critérios petrográficos.

2.1.3 RECURSOS MINERAIS

Ativos minerais são conhecidos no complexo para *commodities* como fosfato, nióbio e terras raras. Bebedouritos, apatitito e carbonatitos ricos em apatita (*i.e.* Estágios I, II e III) estão associados com concentrações de interesse para fosfato. Principal região para fosfato é conhecida como depósito Coqueiros na área central do domínio norte. Importantes reservas de nióbio são formadas por veios e diques de foscoritos ricos em pirocloro e carbonatitos subordinados (*i.e.* Estágios IV e V). A Mina Boa Vista é atualmente o único depósito de nióbio explorado em Catalão II (**Fig. 2.3**), embora também sejam conhecidos os Depósitos Morro do Padre e Mineração Farm. Os depósitos da Mina Boa Vista e Morro do Padre são localizados no domínio sul. O depósito Mineração Farm é intrusivo diretamente sobre bebedouritos no domínio norte. Concentrações de interesse em terras raras estão relacionadas ao dolomita carbonatito tardio (*i.e.* Estágio V). Área de distribuição do dolomita carbonatito é ampla, entretanto uma maior concentração de diques e veios pode ser observada na Mina Boa Vista.



Fig. 2.3 Foto aérea do *open pit* da Mina Boa Vista em Catalão, Goiás.

2.2 PETROGRAFIA

2.2.1 ESTÁGIO I

O primeiro estágio intrusivo é formado pelo tetraferriflogopita bebedourito (**Fig. 2.4, 2.5**). A litologia abrange as porções mais externas da intrusão principal no domínio norte do complexo. Xenoliths do tetraferriflogopita bebedourito são localmente encontrados no domínio sul em áreas do depósito Morro do Padre e sudoeste da mina Boa Vista. O estágio é caracteristicamente representado por bebedouritos finos essencialmente compostos por clinopiroxênio (diopsídio a aegirina-augita) e tetraferriflogopita (**Fig. 2.5E**). Magnetita é ausente. A fase mineral de Ca-Ti é acessória e representada exclusivamente pela titanita. Outros minerais como perovskita e melanita não foram identificados. O tetraferriflogopita bebedourito é cortado por todas as demais litologias descritas nesse capítulo e, por consequência, ocorre frequentemente alterado em flogopititos metassomáticos.

Tetraferriflogopita bebedourito

O tetraferriflogopita bebedourito é verde escuro, granulação fina a média, composto por clinopiroxênio (45-60 vol.%), tetraferriflogopita (30-40 vol.%) e, em menor proporção, apatita (8-15 vol.%; **Fig. 2.4A**). A trama é constituída por cristais de subédricos de clinopiroxênio (0,2-3,0 mm), tetraferriflogopita (0,2-1,2 mm) e apatita (0,1-0,8 mm; **Fig. 2.5A-B**). Foliação magmática é comum e bem marcada pela orientação das lamelas de tetraferriflogopita. Titanita e calcita são acessórios.

O clinopiroxênio é verde claro e anédrico, com inclusões de apatita e tetraferriflogopita (**Fig. 2.5C**). Tetraferriflogopita forma lamelas subédricas com pleocroísmo inverso ($\alpha > \beta = \gamma$; α = castanho avermelhado; β e γ = laranja claro), localmente com núcleos de flogopita marcados pelo pleocroísmo normal. Inclusões de apatita em tetraferriflogopita são comuns. Apatita apresenta hábito caracteristicamente granular. Titanita é acessória de forma intergranular entre as demais fases (0,1-1,0 mm; **Fig. 2.5D**). Calcita é intersticial e ocorre em alguns porções. Zirconolita ocorre raramente como pequenos cristais ($< 0,1$ mm) de relevo alto e cor castanha avermelhada. Com base em relações petrográficas, ordem de cristalização é proposta como ilustrado pela **Tab. 2.3**.

Xenólitos de fenitos potássicos ricos em ortoclásio são frequentes no tetraferriflogopita bebedourito. De forma característica, o contato entre xenólito e bebedourito apresenta bordas de reação marcadas pelo aumento progressivo de minerais máficos (*i.e.* clinopiroxênio e mica). Como consequência da presença desses xenólitos, xenocristais de ortoclásio são também comuns (**Fig. 2.4B**).

Substituição da assembleia magmática é marcada pela formação de anfíbólio [richterita potássica - $(K)(CaNa)(Mg_5)Si_8O_{22}(OH)_2$] e uma segunda geração de tetraferriflogopita. A alteração tardi a pós-magmática ocorre nas bordas de venulações de carbonatos tardios (**Fig. 2.4C**). Típica zanação no contato com os veios é formada por halo proximal com alta proporção em tetraferriflogopita e halo intermediário a distal com anfíbólio e tetraferriflogopita (**Fig. 2.5D**). O anfíbólio é verde a azul claro como agregados finos (0,2-1,0 mm) nas bordas de cristais de clinopiroxênio (**Fig. 2.5C**). Tetraferriflogopita secundária ocorre como *flakes* finos (< 0,5 mm) nas bordas de cristais grossos de tetraferriflogopita e clinopiroxênio. Raro epidoto ocorre como cristais finos (< 0,5 mm) em substituição sobre o clinopiroxênio.

Tab. 2.3 Sequência de cristalização de minerais principais para o tetraferriflogopita bebedourito.

Apatita	-----
Clinopiroxênio	-----
Tetraferriflogopita	-----
Titanita	-----
Calcita	-----

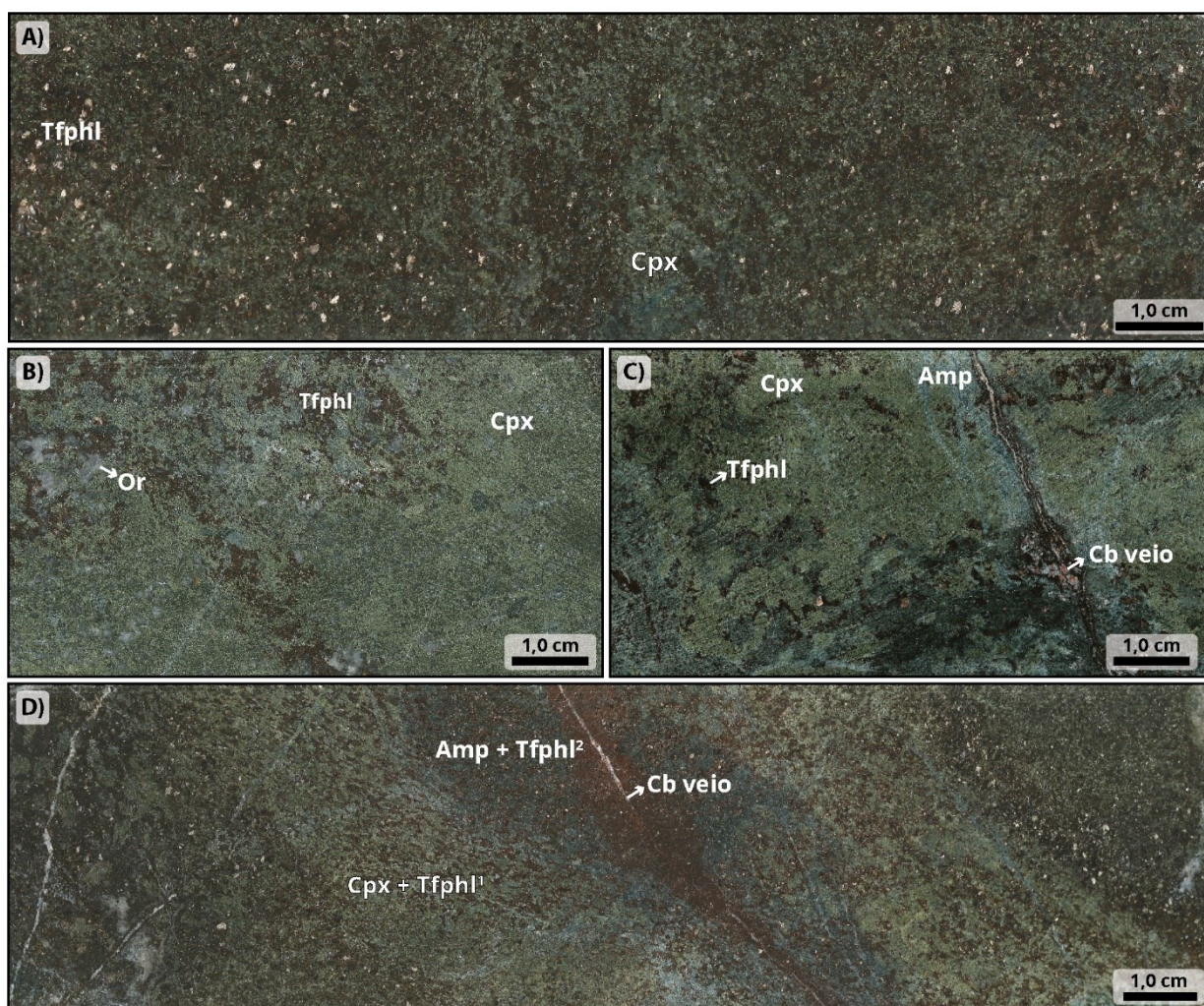


Fig. 2.4 Tetraferri-flogopita bebedourito: **A)** Variedade típica de granulação média fina, verde escuro e formada principalmente por clinopiroxênio e tetraferri-flogopita; **B)** Domínio com alta proporção de clinopiroxênio e, localmente, com xenocristais de ortoclásio; **C)** Veio de carbonatito tardio marcado por halo de anfibólio de cor verde azulada; **D)** Veio de carbonatito com halo metassomático marcado pela presença de anfibólio e tetraferri-flogopita tardia. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Cb – carbonato, Cpx – clinopiroxênio, Or – ortoclásio, Tfphl – tetraferri-flogopita, ¹ – mineral primário e ² – mineral tardio.

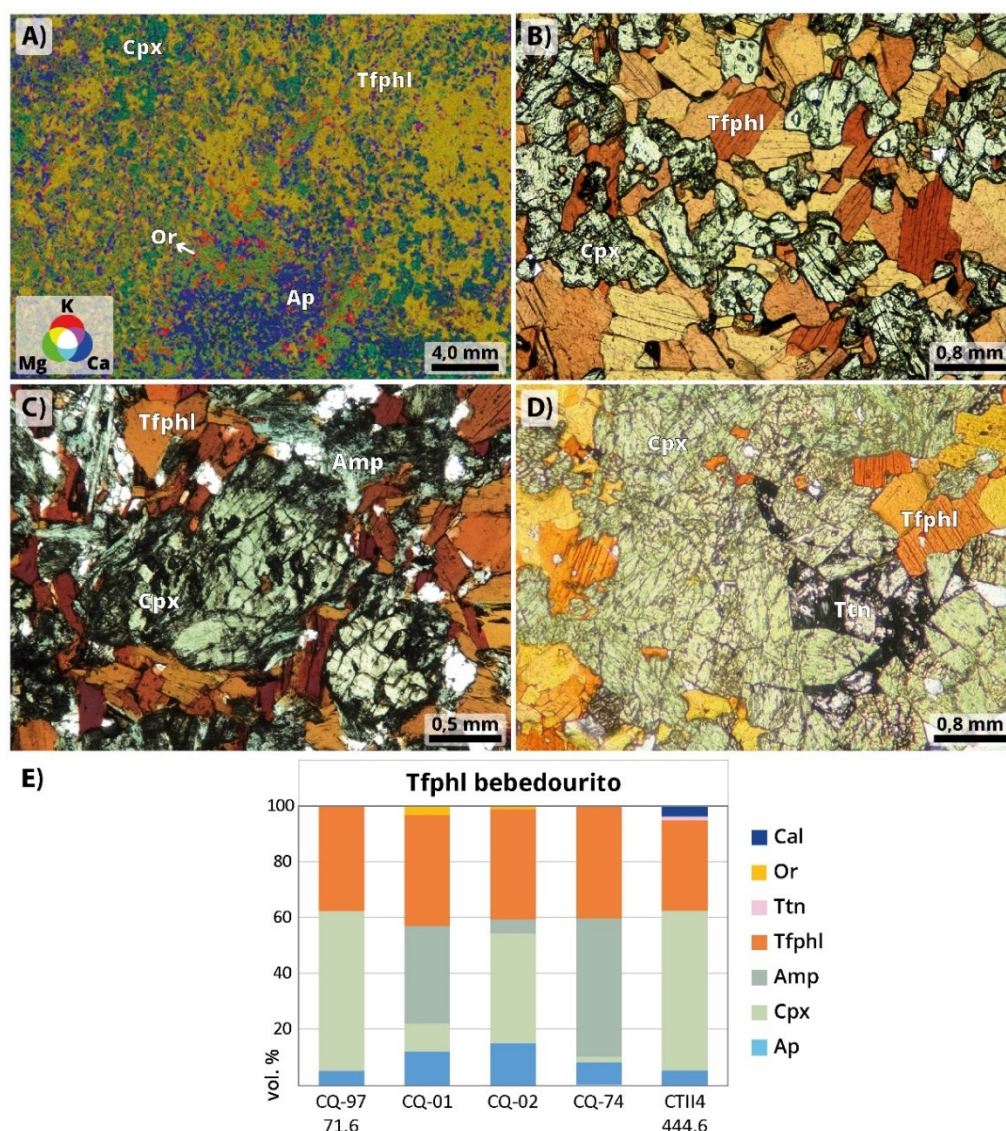


Fig. 2.5 Tetraferrihogopita bebedourito: A) Mapa multi-elementar por microfluorescência de raios X (micro-XRF), com composição correspondente a K-Mg-Ca, ilustrando textura granular formada por tetraferrihogopita, clinopiroxênio, apatita e xenocristais de ortoclásio; B) Textura granular formada por tetraferrihogopita e clinopiroxênio; C) Cristais de clinopiroxênio com inclusões de tetraferrihogopita e, localmente, bordas de anfibólio; D) Cristal anédrico de titanita de forma intersgranular entre os demais minerais; E) Composição modal de tetraferrihogopita bebedouritos em amostras representativas. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Or – ortoclásio, Tfphl – tetraferrihogopita e Ttn – titanita.

2.2.2 ESTÁGIO II

O segundo estágio é formado por diferentes fácies agrupadas por semelhanças em termos de composição, mineralogia e textura (Fig. 2.6). As principais litologias reconhecidas são representadas por apatita bebedourito, tetraferrihogopita apatitito (Fig. 2.7) e diopsídio calcita carbonatito (Fig. 2.8). A relação de contato entre as litologias é predominantemente gradacional. Bandamentos magmáticos são formados por extensas variações modais em escalas que variam de centímetros a até metros. O mapa litológico ilustrado pela Fig. 2.1 representa áreas de predominância no domínio norte. Áreas com maior ocorrência de apatita bebedourito e diopsídio

calcita carbonatito formam *stocks* com formas alongadas intrusivas sobre o tetraferriflogopita bebedourito. Em algumas porções relação de contrato intrusiva com tetraferriflogopita bebedourito é marcada pela presença de diques centimétricos a métricos (**Fig. 2.7A**). Área com maior ocorrência do tetraferriflogopita apatitito é representada na porção central do domínio.

Rochas da série são constituídas por extensas variações na proporção relativa dos constituintes principais como clinopiroxênio (diopsídio), tetraferriflogopita, apatita, titanita, magnetita e calcita. Titanita é acessória e única fase de Ca-Ti. Proporção modal dos minerais principais é indicada na **Fig. 2.9J**.

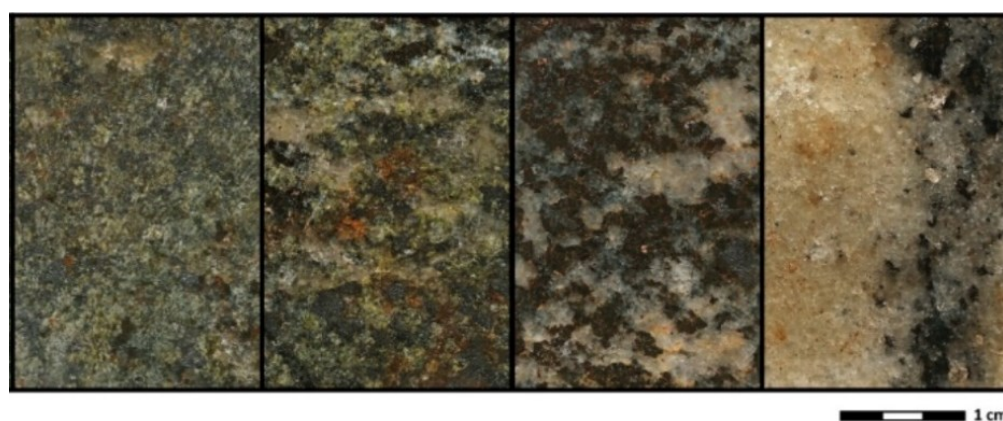


Fig. 2.6 Variação modal observada entre fácies de apatita bebedourito e tetraferriflogopita apatitito em que é possível observar a diminuição da proporção de clinopiroxênio e respectivo aumento de apatita.

Apatita bebedourito

O **apatita bebedourito** é verde escuro, granulação média a grossa (**Fig. 2.7B**). A rocha é composta por clinopiroxênio (20-50 vol.%) e tetraferriflogopita (10-30 vol.%), mas distingue-se pela maior proporção em apatita (15-40 vol.%) e presença de magnetita (5-15 vol.%). A textura é granular (**Fig. 2.9A**) formada por cristais subédricos a anédricos de clinopiroxênio ($\leq 1,5$ mm) e tetraferriflogopita ($\leq 2,0$ mm), e subédricos de apatita (0,2-1,0 mm; **Fig. 2.9B**). Cristais de magnetita ($\leq 4,0$ mm) são anédricos em textura intergranular, com inclusões de todas as demais fases minerais. Em algumas fácies, titanita atinge elevada proporção modal (até 10 vol.%), de forma intergranular às demais fases minerais ($\leq 1,5$ mm) ou como sobrecrescimento em cristais de magnetita (**Fig. 2.9C**). Rara flogopita ($< 1,0$ vol.%) ocorre nas porções centrais de cristais de tetraferriflogopita. Calcita é traço e de forma intersticial.

Tetraferriflogopita apatitito

Em intercalações como parte de bandamentos magmáticos, o aumento progressivo da proporção modal em apatita compreende a formação de apatititos (**Fig. 2.7C**). O tetraferriflogopita apatitito é de granulação média a grossa, e apresenta tonalidades marcadas pelo contraste entre a apatita clara e demais minerais de cor escura (**Fig. 2.7D-E**). A composição é formada por apatita

(40-70 vol.%), tetraferroflogopita (15-40 vol.%), magnetita (5-20 vol.%) e calcita em menor proporção (< 10 vol.%). A textura é granular (**Fig. 2.9D**) a, localmente, intergranular em fácies com maior proporção de calcita (**Fig. 2.9E**). Tetraferroflogopita forma cristais subédricos (0,2-4,0 mm; **Fig. 2.9F**). Apatita é subédrica (0,1-1,0 mm) e ocorre como mosaico intergranular entre os cristais de tetraferroflogopita. Magnetita é anédrica e intergranular (0,5-8,0 mm). Calcita é intersticial às demais fases (< 1,0 mm). Clinopiroxênio é acessório (< 4,5 mm). Titanita ocorre como raros cristais subédricos (0,8-2,0 mm).

Características gerais e relação entre as fases minerais são semelhantes entre o apatita bebedourito e o tetraferroflogopita apatitito. Cristais subédricos de apatita são homogêneos, granulares e totalmente livre de inclusões. Tetraferroflogopita é caracterizada pelo pleocroísmo inverso ($\alpha > \beta = \gamma$; α = castanho escuro; β e γ = laranja avermelhado) e pode conter inclusões de apatita, clinopiroxênio e magnetita. Cristais de clinopiroxênio são levemente pleocróicos em tons de verde claro, localmente zonados e com inclusões de apatita e, em menor proporção, tetraferroflogopita e magnetita. Magnetita apresentam bordas irregulares em aspecto intersticial e poiquilíticos com inclusões de demais fases. Titanita é intergranular e, por vezes, ocorre como sobrecrecimento entre cristais de magnetita.

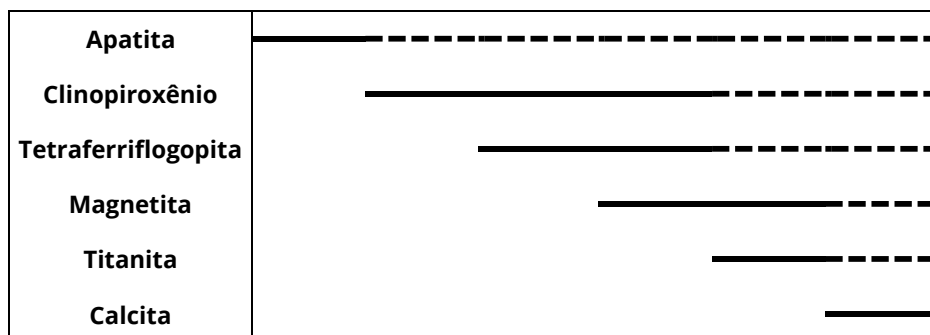
Minerais acessórios comuns são zircão, pirrotita, calcopirita e bornita. Zircão é euédrico a subédrico (0,1-0,8 mm). Pirrotita (< 0,5 mm) e calcopirita (< 0,4 mm) são anédricas e intersticiais. Bornita está em associação com calcopirita como inclusões (< 0,2 mm).

Relações texturais entre os minerais principais sugerem sequência de cristalização conforme ilustrado pela **Tab. 2.4**. A formação de apatita é precoce seguida por clinopiroxênio e tetraferroflogopita. Embora clinopiroxênio e tetraferroflogopita contenham localmente inclusões de magnetita, fatores como a presença de cristais com hábito anédrico e aspecto poiquilítico indicam a formação de magnetita até os estágios finais de cristalização. Titanita é anédrica e ocorre como sobrecrecimento em cristais de magnetita. Calcita é intersticial aos demais minerais e possivelmente representa última fase a ser cristalizada pelo magma.

Alteração se sobrepõe à paragênese magmática primária nas regiões em contato com diques e veios tardios. Agregados finos de tetraferroflogopita são formados em substituição a grandes cristais primários de tetraferroflogopita (**Fig. 2.9B**) e como bordas de reação em cristais de clinopiroxênio. De maneira distinta à tetraferroflogopita magmática, *flakes* tardios apresentam granulação fina (< 0,5 mm) e pleocroísmo em tons de laranja claro. Formação de anfíbólio (*i.e.* richterita potássica) ocorre em substituição aos cristais de clinopiroxênio. Transformação pervasiva de cristais de clinopiroxênio produz pseudomorfos preenchidos por agregados finos de

anfíbólio e tetraferroflogopita. Lamelas de exsolução de ilmenita ocorrem sobre cristais de magnetita no apatita bebedourito. Pirita é tardia e ocorre como bordas de reação sobre cristais de pirrotita. Veios finos de pirita e carbonatos são tardios e cortam a trama magmática.

Tab. 2.4 Sequência de cristalização de minerais principais para o apatita bebedourito e tetraferroflogopita apatitito.



Diopsídio calcita carbonatito

O diopsídio calcita carbonatito ocorre como *stocks* e *plugs* alongados no domínio norte (**Fig. 2.1**) e em associação direta com o apatita bebedourito e tetraferroflogopita apatitito. Em porções formadas por pacotes espessos de carbonatito (> 10 m), o contato com o tetraferroflogopita apatitito é gradacional pelo aumento progressivo da proporção de calcita. Em demais áreas, diques decimétricos a métricos ocorrem de forma subordinada cortando predominantemente o tetraferroflogopita bebedourito.

O carbonatito é verde claro a branco, granulação entre fina e média a, localmente, grossa (**Fig. 2.8**). A proporção de minerais silicáticos, apatita e magnetita é caracteristicamente elevada (até 45 vol.%) em comparação com calcita (55-80 vol.%). Dentre minerais não carbonáticos, destaca-se a presença de tetraferroflogopita (10-30 vol.%), clinopiroxênio (até 20 vol.%), apatita (5-10 vol.%), magnetita (1-5 vol.%) e titanita ($< 1-8$ vol.%). Em algumas porções, estrutura de fluxo magmático é marcada pela formação de bandamentos ricos em tetraferroflogopita e outros minerais não carbonáticos. Rara flogopita ocorrem nas porções centras de cristais de tetraferroflogopita.

A textura é variável entre fácies com granulações distintas. Em fácies de granulação média a grossa (**Fig. 2.8A**), a textura granular formada por cristais subédricos a anédricos de calcita são ($\leq 3,0$ cm) e cristais subédricos de tetraferroflogopita (0,2-1,0 mm) e clinopiroxênio (0,2-2,0 mm; **Fig. 2.9G**). Apatita (0,1-0,8 mm) e magnetita (0,1-2,0 mm) são intergranulares (**Fig. 2.9H**). Localmente, cristais subédricos a euédricos de titanita (0,1-2,5 mm) podem ocorrer em maior proporção (até 8 vol.%). Em algumas porções, clinopiroxênio é acessório ou ausente (**Fig. 2.8B-C**). Em fácies de granulação fina como diques a textura é inequigranular (**Fig. 2.8D**) formada por

cristais grossos de tetraferroflogopita (< 5,0 mm) em uma matriz equigranular composta por calcita (0,1-1,0 mm), tetraferroflogopita (0,1-1,0 mm), clinopiroxênio (0,1-0,8 mm) e apatita (0,1-1,2 mm; **Fig. 2.9I**). Magnetita é anédrica e intersticial entre as demais fases (0,1-0,8 mm).

Sulfetos e zircão são acessórios. Pirrotita, calcopirita e bornita são associadas como fases intersticiais (0,2-1,0 mm). Zircão é acessório em cristais subédricos (0,2-0,5 mm). Ilmenita e anfibólio constituem assembléia tardi-magmática. Ilmenita ocorre como lamelas de exsolução na magnetita e, localmente, como cristais subédricos finos (< 0,5 mm). Agregados finos de anfibólio são polimorfos formados pela substituição tardia de cristais de clinopiroxênio.

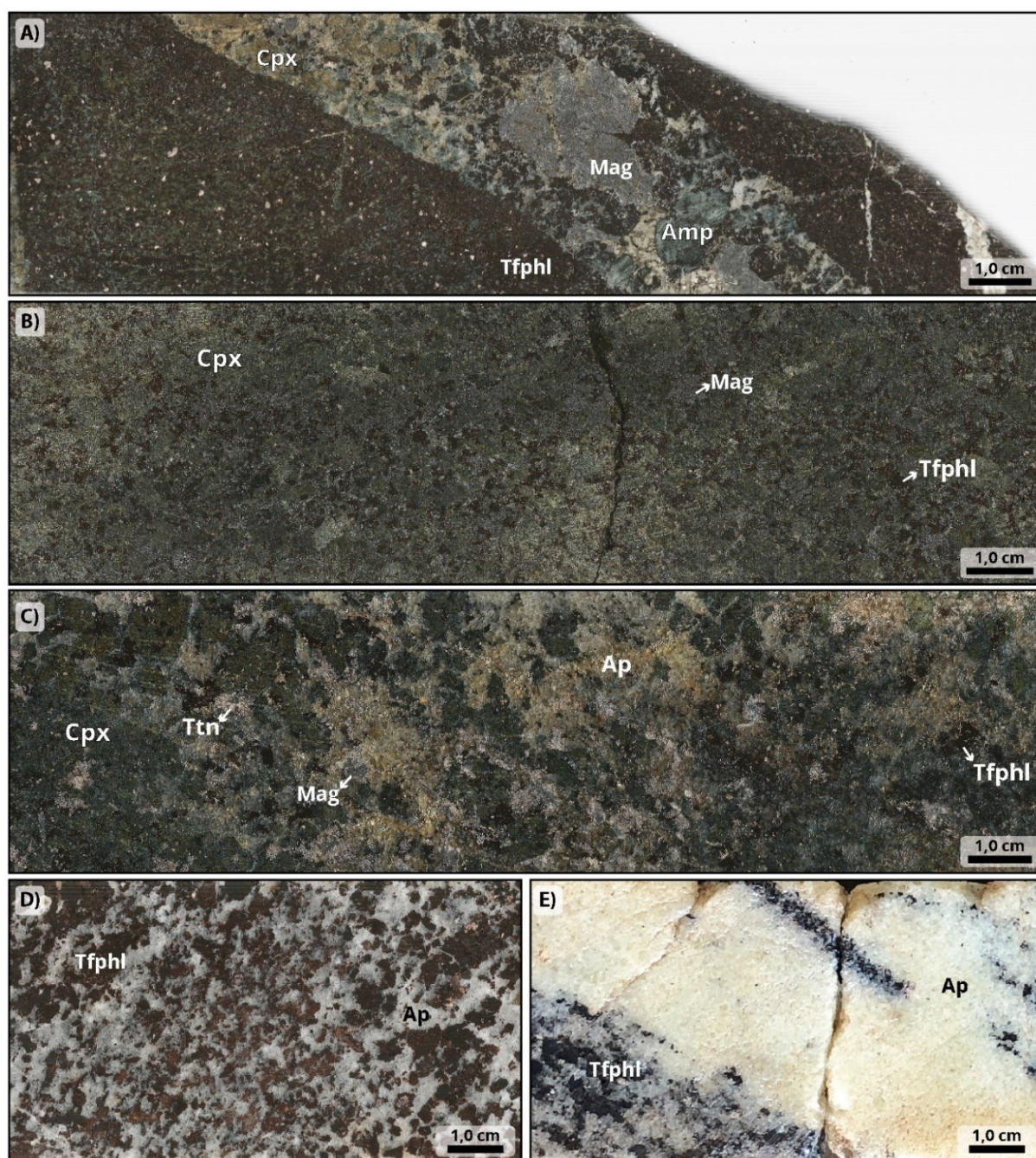


Fig. 2.7 Apatita bebedourito: A) Dique centimétrico de apatita bebedourito intrusivo em tetraferroflogopita bebedourito; B) Variedade típica de apatita bebedourito de granulação média e mais alta

proporção em clinopiroxênio (> 50 vol.%); **C)** Amostra ilustrando graduação entre bebedourito e domínio com maior proporção em apatita (> 30 vol.%). **Tetraferrihogopita apatitito: D)** Variedade típica formada por apatita, tetraferrihogopita e magnetita acessória; **E)** Domínio com alta proporção em apatita (> 70 vol.%). **Abreviações:** Amp – anfíbólio, Ap – apatita, Cpx – clinopiroxênio, Mag – magnetita e Tfphl – tetraferrihogopita.

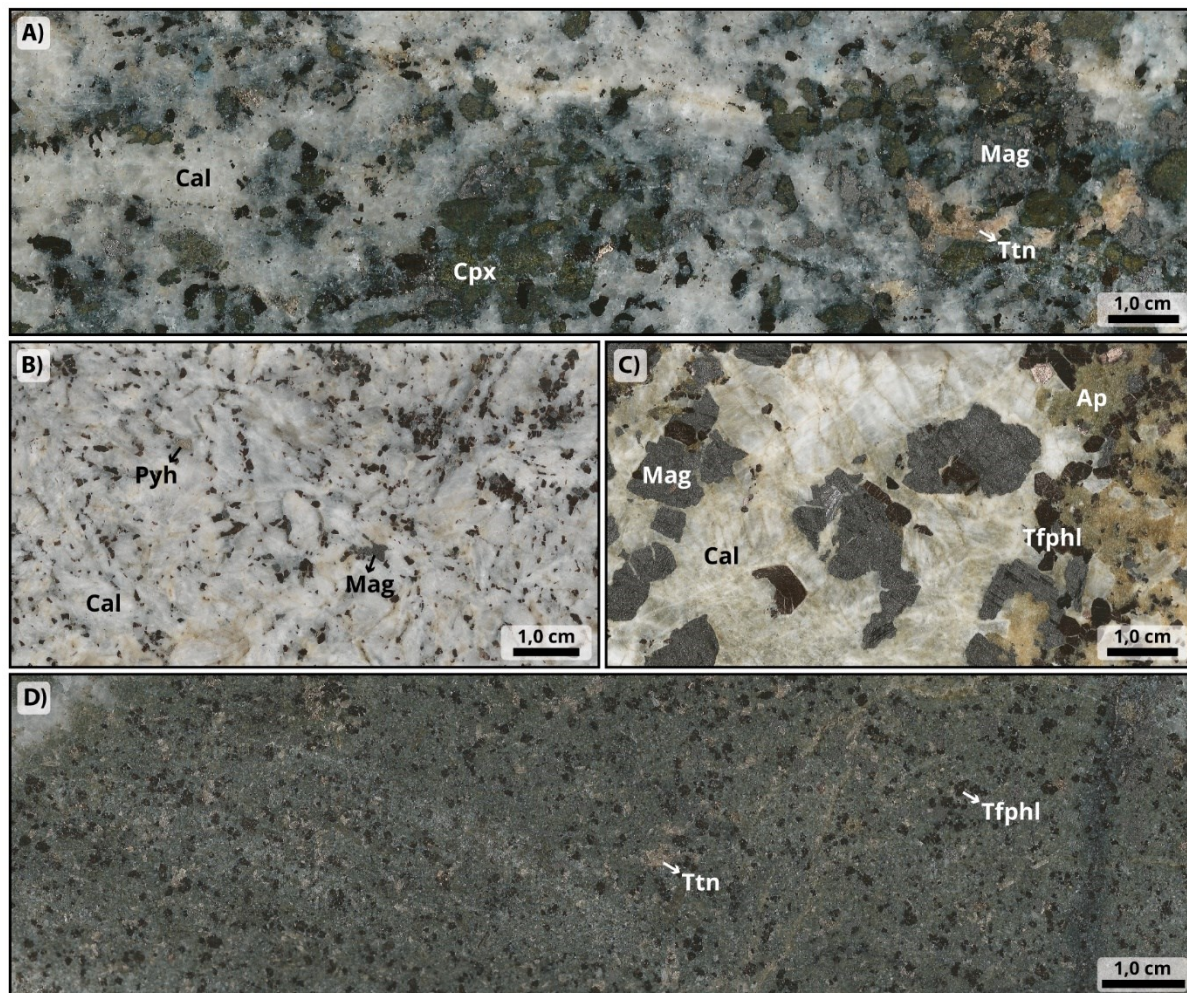


Fig. 2.8 Diopsídio calcita carbonatito: **A)** Variedade de granulação média e textura granular com cristais de calcita, clinopiroxênio, tetraferrihogopita, magnetita e titanita; **B)** Textura equigranular formada por cristais de calcita e acessórios de forma intergranular; **C)** Cumulados de apatita, tetraferrihogopita e magnetita entre cristais grossos de calcita; **D)** Variedade de granulação fina, verde escuro, com textura inequigranular formada por cristais de tetraferrihogopita em matriz com calcita, clinopiroxênio e titanita. **Abreviações:** Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Mag – magnetita, Tfphl – tetraferrihogopita e Ttn – titanita.

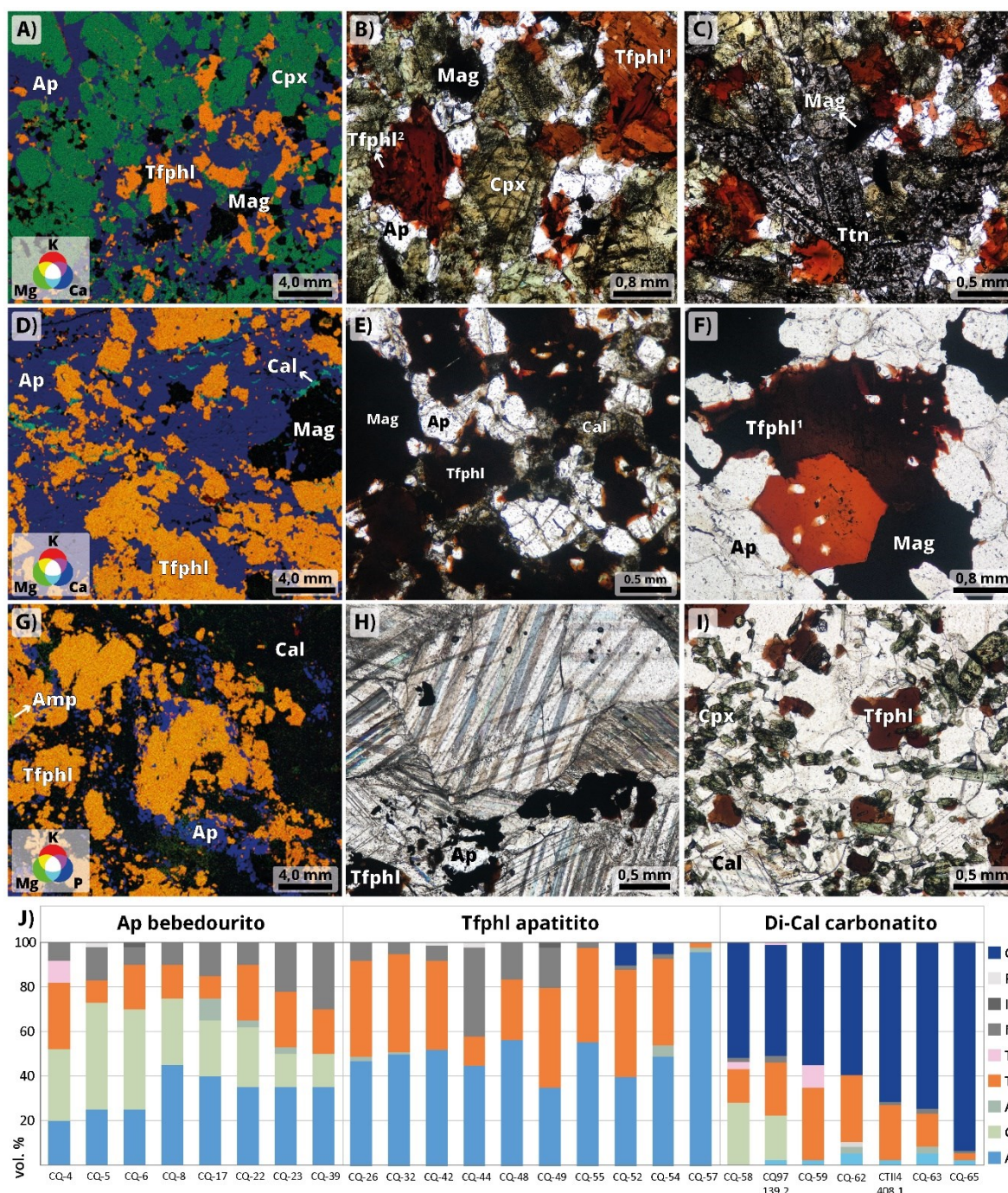


Fig. 2.9 Apatita bebedourito: **A)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (K-Mg-Ca) ilustrando textura granular formada por clinopiroxênio, apatita, tetraferroflogopita e magnetita. **B)** Apatita intergranular entre cristais de clinopiroxênio e tetraferroflogopita. Localmente, cristais de flogopita apresentam *flakes* secundários nas bordas. **C)** Titanita intersticial com inclusões de apatita e magnetita. **Tetraferroflogopita apatitito:** **D)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (K-Mg-Ca) ilustrando textura granular formada por apatita, tetraferroflogopita e magnetita. **E)** Calcita intergranular entre cristais de apatita e tetraferroflogopita; **F)** Cristais euédricos de tetraferroflogopita com inclusões de apatita. **Diopsídio calcita carbonatito:** **G)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (K-Mg-P) em domínio marcado por elevada proporção em tetraferroflogopita; **H)** Agregados finos de magnetita e apatita intergranulares entre cristais grossos de calcita; **I)** Matriz equigranular formada por cristais de calcita, clinopiroxênio e tetraferroflogopita. **J)** Composição modal de litologias no estágio II para amostras representativas. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Di – diopsídio, Ilm – ilmenita, Mag – magnetita, Pyh – pirrotita, Tfphl – tetraferroflogopita, Ttn – titanita, ¹ – mineral primário, ² – mineral tardio.

2.2.3 ESTÁGIO III

O terceiro estágio é formado por bebedouritos tardios pareados com respectivo calcita carbonatito (**Fig. 2.10, 2.11, 2.12**). Rochas nesse estágio ocorrem como *stocks*, *plugs* e diques em escala métrica (< 5,0 m) intrusivos sobre bebedouritos dos estágios anteriores. Variações modais entre fácies são representados por clinopiroxênio (diopsídio a aegirina-augita), tetraferriflogopita, apatita, titanita e calcita (**Fig. 2.13J**). Magnetita é ausente. De forma similar às demais unidades, titanita é a única fase de Ca-Ti presente.

Titanita bebedourito

O titanita bebedourito é verde escuro, com granulação média a grossa (**Fig. 2.11A-B**). A composição é formada por clinopiroxênio (40-60 vol.%), apatita (20-30 vol.%), tetraferriflogopita (10-20 vol.%) e titanita (2-8 vol.%). A textura é granular composta por cristais subédricos de clinopiroxênio (0,5-5,0 mm), tetraferriflogopita (0,5-4,5 mm) e subédricos a euédricos de titanita (0,2-3,0 mm; **Fig. 2.13A-B**). Apatita é subédrica e intergranular aos demais minerais (0,1-1,5 mm; **Fig. 2.13C**). Calcita é acessória de forma intersticial (até 5 vol.%). Foliação de fluxo magmático ocorre localmente em diques pela orientação das lamelas de tetraferriflogopita.

Domínios com aspecto rosado são formados por acumulações de titanita (**Fig. 2.11C**). Nessas porções a granulação é grossa a, por vezes pegmatóide. Proporção modal de titanita pode atingir de 40 a até 60 vol.%, com menor clinopiroxênio (20-30 vol.%), apatita (15-20 vol.%), e tetraferriflogopita (5-10 vol.%). A textura é granular com cristais grossos de clinopiroxênio (< 6,0 mm; **Fig. 2.13D**) e tetraferriflogopita (< 4,0 mm), e mosaico intergranular composto por titanita (0,2-2,0 mm) e apatita (0,1-1,0 mm; **Fig. 2.13E**). Localmente, textura peculiar é formada por titanita em agregado radial de cristais (**Fig. 2.13F**).

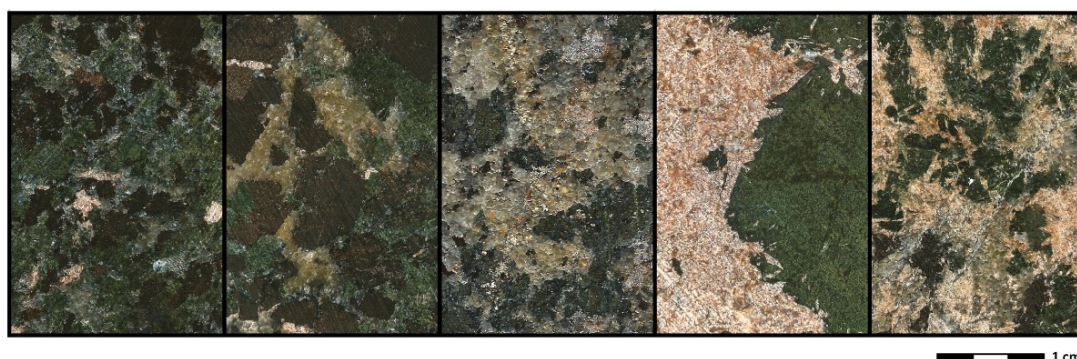


Fig. 2.10 Variação modal observada entre fácies do titanita bebedourito representada por proporções distintas entre clinopiroxênio, apatita e titanita.

Com base nas características texturas, a ordem de cristalização magmática é proposta como na **Tab. 2.5**. Apatita apresenta hábito granular e totalmente livre de inclusões. Titanita forma cristais esfenoidais em cor caramelo rosada, localmente com inclusões de apatita. Clinopiroxênio

é zonado em algumas porções (**Fig. 2.13C**), apresenta forte pleocroísmo em tons de verde escuro a verde esmeralda, alto ângulo de eixo óptico ($2V_{\alpha} \sim 70^{\circ}$) e inclusões de apatita, titanita e tetraferriflogopita. De forma distinta as demais rochas, tetraferriflogopita é castanho escuro (α = castanho escuro; β e γ = castanho escuro avermelhado). Cristais de tetraferriflogopita englobam inclusões de todas as demais fases. Calcita é anédrica e intersticial entre as demais fases. Assembleia tardi- a pós-magmática é marcada pela formação de agregados finos de anfibólio como bordas de alteração em cristais de clinopiroxênio. Localmente, venulações tardias de carbonatos e pirita cortam a trama magmática.

Tab. 2.5 Sequência de cristalização dos principais minerais no titanita bebedourito.

Apatita	-----
Titanita	-----
Clinopiroxênio	-----
Tetraferriflogopita	-----
Calcita	-----

Aegirina-augita calcita carbonatito

A progressão na proporção de calcita em *stocks* e diques do titanita bebedourito gradaciona para domínios de um segundo calcita carbonatito. Diques decimétricos a métricos ocorrem de forma localizada cortando estágios anteriores. A presença de clinopiroxênio verde escuro é característica desse carbonatito, como reflexo de uma composição predominantemente como aegirina-augita.

O aegirina-augita calcita carbonatito é branco, com granulação média a grossa (**Fig. 2.12**). Os constituintes principais são representados por calcita (60-80 vol.%), clinopiroxênio (5-20 vol.%) e tetraferriflogopita (10-15 vol.%). A textura é granular formada por cristais subédricos a anédricos de calcita (0,4-2,5 mm; **Fig. 2.13G**), subédricos de clinopiroxênio (0,2-2,0 mm) e tetraferriflogopita (0,2-1,8 mm **Fig. 2.13H**).

Apatita (2-5 vol.%), titanita (<1-2 vol.%) e zircão (< 1 vol.%) são acessórios. Apatita é intergranular entre as demais fases (0,1-0,8 mm; **Fig. 2.13H**). Titanita é euédrica a subédrica (0,2-1,0 mm). Zircão é subédrico e normalmente apresenta bordas de alteração (0,2-0,5 mm). Raro cristal de wadeita ($K_2ZrSi_3O_9$) ocorre como cristais subédricos finos (0,2-0,5 mm). Wadeita é incolor, de relevo alto, com alta birrefringência de segunda a terceira ordem (**Fig. 2.13I**). Localmente, anfibólio ocorre em sobrecrecimentos sobre cristais de clinopiroxênio.

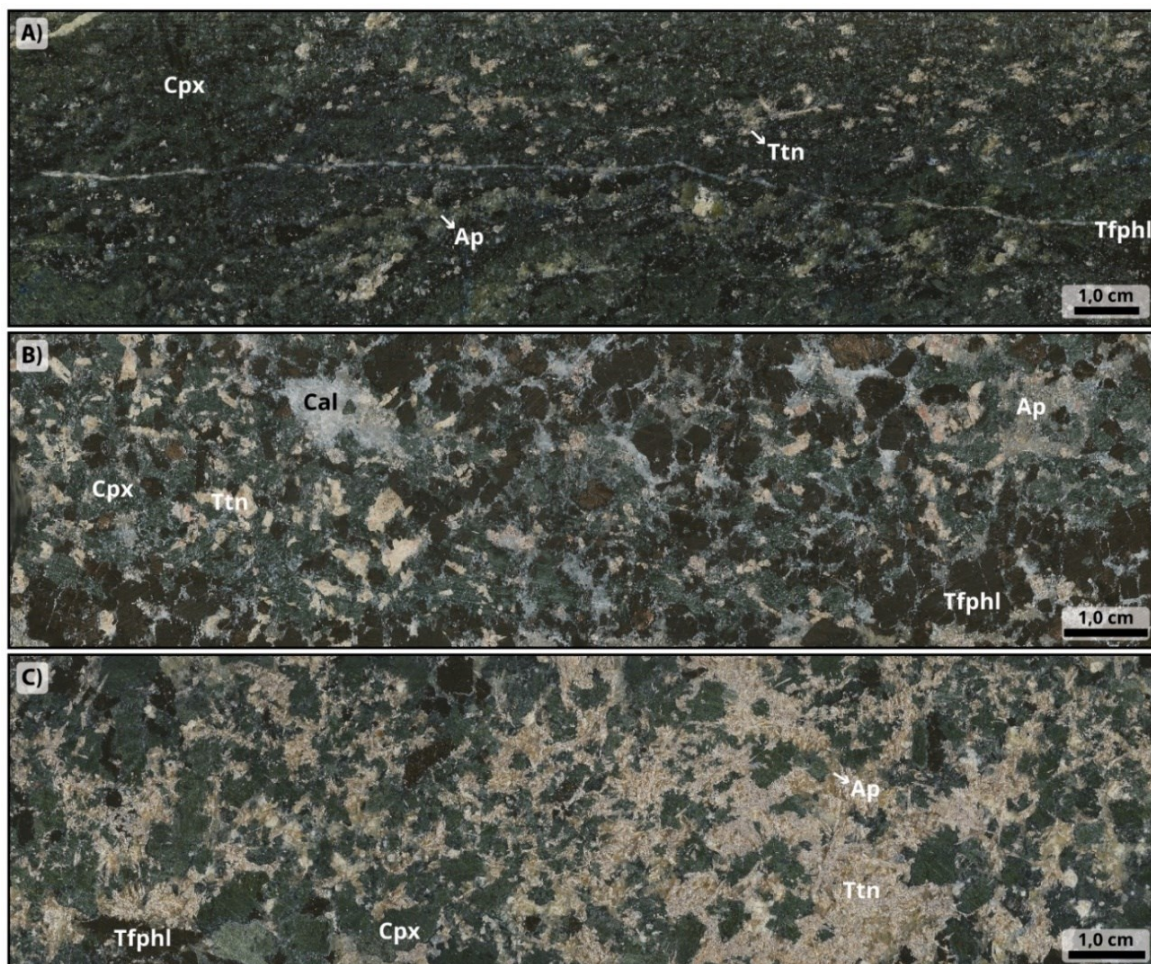


Fig. 2.11 Titanita bebedourito: **A)** Típica variedade de granulação média, cor verde escuro e textura granular formada por clinopiroxênio, apatita, tetraferriphlogopita e titanita. **B)** Amostra de granulação média com calcita intergranular; **C)** Domínio marcado pela acumulação de titanita e, em menor proporção, clinopiroxênio e tetraferriphlogopita.

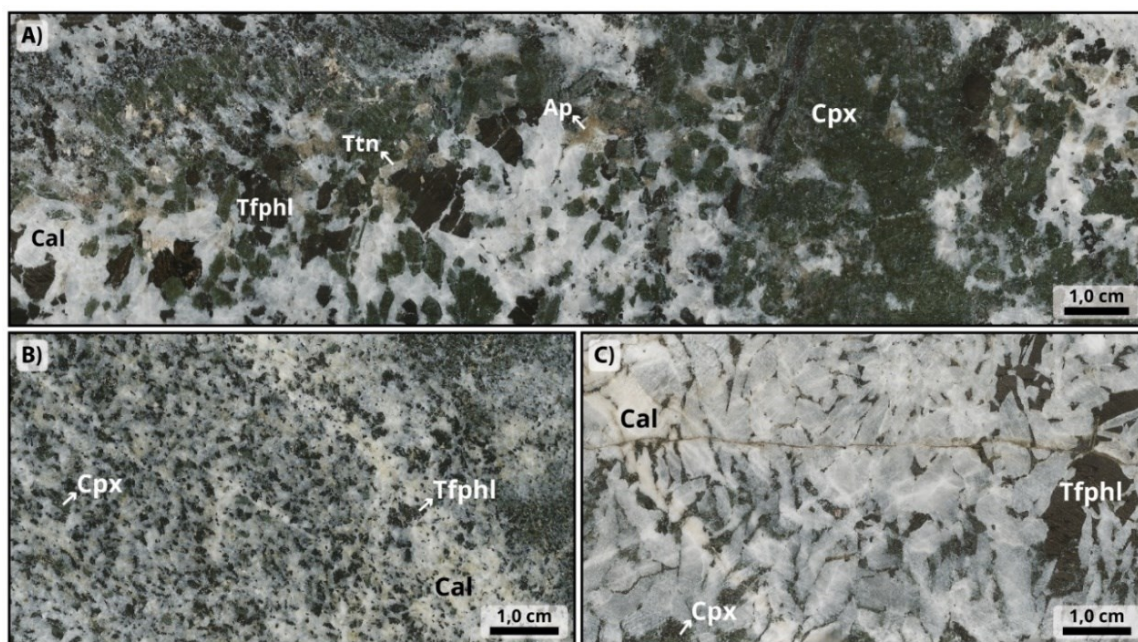


Fig. 2.12 Aegirina-augita calcita carbonatito: **A)** Variedade típica de granulação média grossa e textura granular formada por calcita, clinopiroxênio, tetraferriphlogopita e apatita. **B)** Variedade de granulação média fina. **C)** Amostra de granulação grossa formado por tetraferriphlogopita e clinopiroxênio intergranulares entre cristais grossos de calcita. **Abreviações:** Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Tfphl – tetraferriphlogopita e Ttn – titanita.

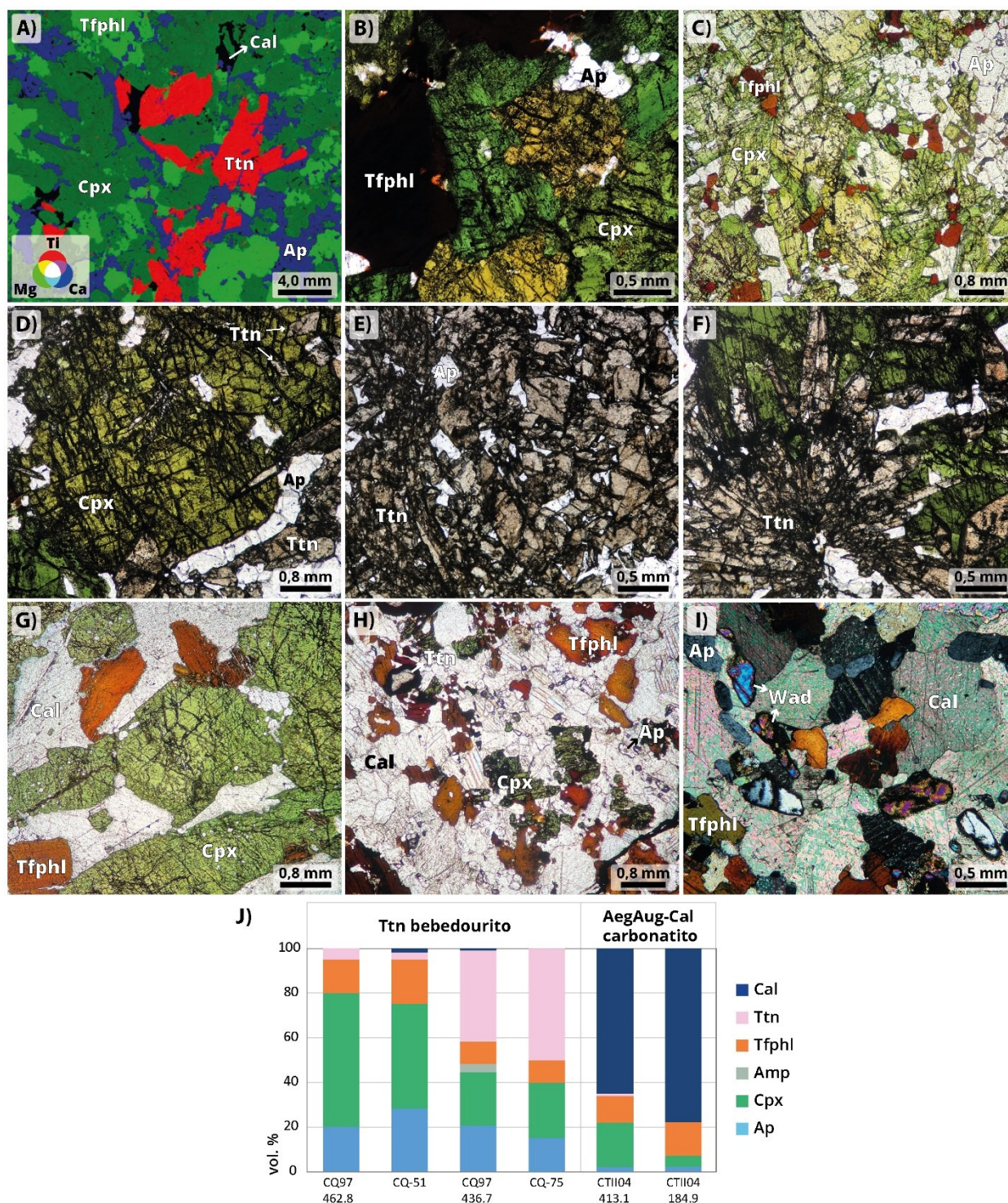


Fig. 2.13 Titanita bebedourito: A) Mapa multi-elementar por micro-XRF (Ti-Mg-Ca) ilustrando textura granular; B) Cristais de clinopiroxênio e tetraferroflogopita; C) Fácies com apatita intergranular entre os cristais de clinopiroxênio; D) Cristais de clinopiroxênio com inclusões de titanita; E) Domínio com titanita e apatita intergranulares; F) Agregado radial de titanita. **Aegirina-augita calcita carbonatito:** G) Textura granular formada por cristais de calcita, clinopiroxênio e tetraferroflogopita; H) Textura granular em variedade de granulação média; I) Cristais de wadeita subédricos caracterizados por alto relevo e birrefringência em cores de terceira ordem. **Abreviações:** Amp – anfíbio, Ap – apatita, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Tfphl – tetraferroflogopita, Ttn – titanita e Wad – wadeita.

2.2.4 ESTÁGIO IV

O quarto estágio é formado por foscoritos e calcita carbonatito (**Fig. 2.14, 2.14, 2.15**). Diques e veios são intrusivos sobre bebedouritos e ocorrem de forma aleatória sobre todo o domínio norte. *Stocks* e diques em maior concentração ocorre na área do depósito Mineração Farm. No domínio sul, o estágio compreende a maior parte do volume de rochas ígneas em dois *pipes* verticais nas áreas dos depósitos Boa Vista e Morro do Padre. De forma similar aos estágios anteriores, fácies são reconhecidas com base na proporção modal dos minerais. Dentre os principais constituintes da paragênese, destacam-se olivina, tetraferroflogopita, apatita, magnetita e calcita (**Fig. 2.17M**).

Foscoritos

Tipos petrográficos são reconhecidos como olivina foscorito, tetraferroflogopita foscorito e apatita foscorito. A distribuição entre as fácies se distingue entre áreas do complexo. Olivina foscorito ocorre no domínio norte como diques intrusivos sobre os bebedouritos. Tetraferroflogopita foscorito e apatita foscorito são mais abundantes no domínio sul, embora também estejam presentes em menor volume no domínio norte.

O **olivina foscorito** *strictu sensu* é verde escuro e de granulação fina a média (**Fig. 2.14A-B**). A rocha é formada por apatita (30-40 vol.%), olivina (25-40 vol.%), magnetita (5-20 vol.%) e tetraferroflogopita (5-15 vol.%). A textura é formada por cristais subédricos de olivina (2,0-8,0 mm) e anédricos de magnetita (< 8,0 mm) e mosaico intergranular fino com apatita, olivina, magnetita e tetraferroflogopita (0,1-2,0 mm; **Fig. 2.17A**). Apatita é homogênea, livre de inclusões e possui hábito granular. Olivina é euédrica a subédrica, por vezes geminada, com inclusões de apatita e magnetita (**Fig. 2.17B**). Magnetita é anédrica em textura poiquilítica, englobando cristais de apatita, olivina e localmente tetraferroflogopita (**Fig. 2.17C**). Lamelas de exsolução em ilmenita são frequentes. Calcita é acessória e de forma intersticial entre os cristais de calcita. Outros minerais acessórios são zircão (0,2-1,5 mm) e sulfetos como pirrotita (0,2-3,0 mm), calcopirita e bornita (< 0,5 mm).

O **tetraferroflogopita foscorito** é cinza escuro e apresenta variações em fácies de granulação média a grossa (**Fig. 2.14C**). A rocha é formada por tetraferroflogopita (20-50 vol.%), magnetita (15-40 vol.%), apatita (10-30 vol.%) e calcita (5-20 vol.%). Olivina ocorre localmente como acessório (< 5 vol.%). A textura é granular constituída por cristais euédricos a subédricos de tetraferroflogopita (0,2-5,0 mm) e subédricos de apatita (0,1-1,5 mm; **Fig. 2.17D**). Magnetita é anédrica e intergranular (0,2-8,0 mm; **Fig. 2.17E**). Calcita ocorre como *pockets* em dimensões variadas (**Fig. 2.14C**) ou de forma intersticial aos demais minerais (**Fig. 2.14D**).

Tetraferroflogopita apresenta inclusões de apatita e, localmente, de magnetita. Apatita é granular e livre de inclusões. Magnetita é poiquilítica com abundantes inclusões apatita e tetraferroflogopita. Olivina é subédrica e apresenta normalmente bordas de alteração para clinohumita e serpentina (**Fig. 2.17F**). Pirocloro, ilmenita e sulfetos são acessórios comuns. Pirocloro é euédrico a subédrico (0,1-1,5 mm), apresenta zonação e contém inclusões locais de apatita. Ilmenita é euédrica a subédrica (0,1-1,0 mm). Calcopirita, pirrotita e bornita são os principais sulfetos, ocorrem de forma intersticial (0,1-3,0 mm) e, localmente, podem ocorrer em maior proporção chegando a até 10 vol.% (**Fig. 2.14E**). Dolomita e barita ocorrem como pequenos cristais (< 0,5 mm) nos *pockets* de calcita.

O **apatita foscorito** é cinza claro, granulação média a fina, e ocorre como diques (**Fig. 2.15A**) ou de forma intergranular como cumulos entre domínios do tetraferroflogopita foscorito (**Fig. 2.15B**). Apatita (50-70 vol.%), magnetita (20-40 vol.%) e calcita (5-10 vol.%) são os principais minerais formadores. A textura é granular constituída por cristais euédricos a subédricos apatita (<0,1-1,0 mm), e subédricos a anédricos de magnetita (0,2-1,5 mm; **Fig. 2.17G**). Calcita é intersticial ou como pequenos *pockets* (**Fig. 2.15C**). Pirocloro ocorre como cristais euédricos (0,1-0,5 mm; **Fig. 2.17H**) e pode chegar a até 5 vol.% em proporção modal. Outros acessórios são tetraferroflogopita, olivina, ilmenita e calcopirita. Tetraferroflogopita é subédrica a anédrica (0,2-1,2 mm) com inclusões de apatita e pirocloro (**Fig. 2.17I**). Localmente, pseudomorfos de olivina ocorrem transformados em clinohumita e serpentina (< 2 vol.%). Ilmenita e calcopirita formam cristais finos intersticiais (< 1,0 mm). Dolomita e barita ocorrem associados aos *pockets* de calcita.

Sequência de formação dos minerais é proposta para os foscoritos como ilustrado pela **Tab. 2.6**. A cristalização de apatita é possivelmente precoce pela total ausência de inclusões de outras fases minerais. Olivina e tetraferroflogopita são os principais silicatos, cuja cristalização pode ter sido concomitante em determinado momento da história evolutiva. Olivina apresenta frequentes inclusões de apatita e tetraferroflogopita, enquanto tetraferroflogopita apresenta inclusões de apatita e, localmente, olivina. Formação de magnetita tende aos momentos finais de cristalização, por característica como o hábito sistematicamente anédrico de forma intergranular e com abundantes inclusões.

Alteração tardi a pós-magmática nessas rochas é imposta pela sobreposição de venulações carbo-hidrotermais. Cristais de olivina apresentam frequentes bordas constituídas por *flakes* finos de tetraferroflogopita. Em algumas porções olivina é totalmente alterada para serpentina e clinohumita. Venulações de pirita e carbonatos tardios são comuns. Carbonatos nesses veios são representados principalmente por ankerita.

Textura peculiares podem ser observadas em algumas porções em rochas associadas a esse estágio. Acumulações de pirocloro formam fácies com elevada proporção modal, podendo chegar a até 30 vol.% (**Fig. 2.15D**). Cristais dentrícos de magnetita apresentam formas alongadas intercalados entre pockets de calcita e, por vezes, com pirrotita nas porções centrais (**Fig. 2.15E**).

Tab. 2.6 Sequência de cristalização dos minerais principais nos foscoritos.

Apatita	—————
Olivina	—————
Tetraferriflogopita	—————
Magnetita	—————
Calcita	—————

Tetraferriflogopita calcita carbonatito

O tetraferriflogopita calcita carbonatito é branco e de granulação média a grossa. A proporção dos constituintes principais é variável e abrange fácies com alta proporção em minerais não carbonáticos (**Fig. 2.16**). A composição mineral é formada principalmente por calcita (70-95 vol.%), tetraferriflogopita (5-20 vol.%), magnetita (2-10 vol.%) e apatita (<1-5 vol.%). A textura predominante é granular (**Fig. 2.17J**) e são frequentes domínios com minerais orientados de acordo com fluxo magmático. Calcita (0,5-8,0 mm) e magnetita (0,2-5,0 mm) formam cristais subédricos a anédricos, tetraferriflogopita (0,2-1,0 mm) e apatita (0,1-0,5 mm) são euédricas a subédricas.

Pirocloro, ilmenita, pirrotita, calcopirita, dolomita, norsethita, barita e estroncianita são acessórios. A presença de pirocloro como mineral acessório é comum (até 2 vol.%) como cristais euédricos a subédricos (0,2-0,8 mm; **Fig. 2.17K**). Ilmenita, pirrotita e calcopirita formam cristais finos intersticiais (< 0,5 mm). Em algumas porções, cristais de pirrotita apresentam hábitos alongados em típicas texturas dentrícas (**Fig. 2.15E**). Dolomita, barita e norsethita formam cristais intergranulares (< 0,1-0,3 mm) entre a calcita (**Fig. 2.17L**). Pequenos cristais de barita e estroncianita possivelmente como exsoluções ocorrem na calcita (< 0,1 mm). Minerais pós-magmáticos são representados por venulações de pirita e ankerita.

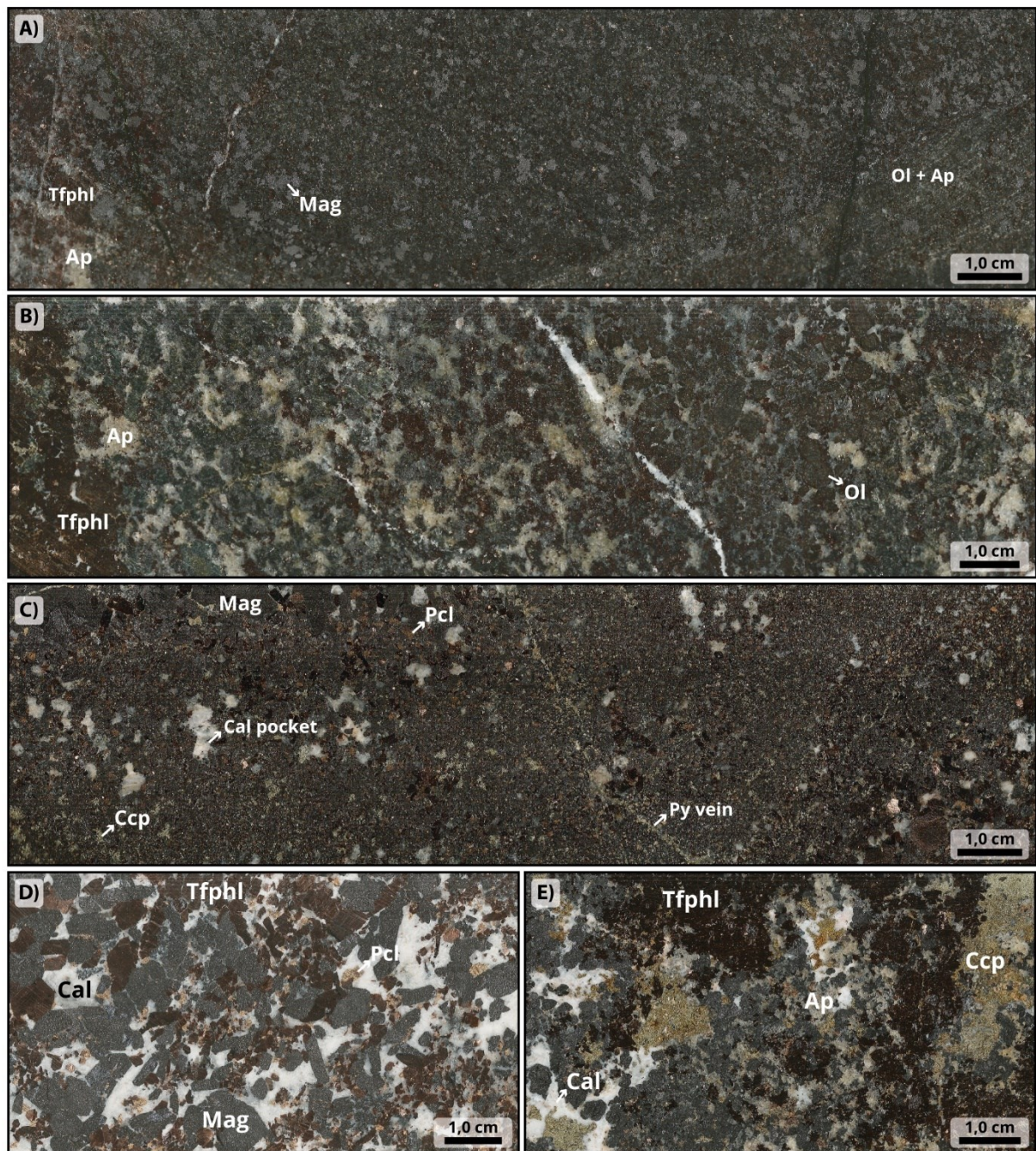


Fig. 2.14 Olivina foscrito: **A)** Variedade de aspecto verde escuro formada por cristais de magnetita e mosaico granular com apatita, olivina e menor tetraferriphlogopita; **B)** Variedade de granulação média a grossa com cristais visíveis de olivina localmente com bordas de tetraferriphlogopita. **Tetraferriphlogopita foscrito:** **C)** Típica amostra de granulação média fina formado por abundante magnetita, tetraferriphlogopita, apatita, *pockets* de calcita e menor pirocloro; **D)** Variedade com abundante calcita de forma intersticial aos demais minerais; **E)** Amostra com alta proporção em calcopirita. **Abreviações:** Ap – apatita, Cal – calcita, Ccp – calcopirita, Mag – magnetita, Ol – olivina, Pcl – pirocloro, Tfphl – tetraferriphlogopita.

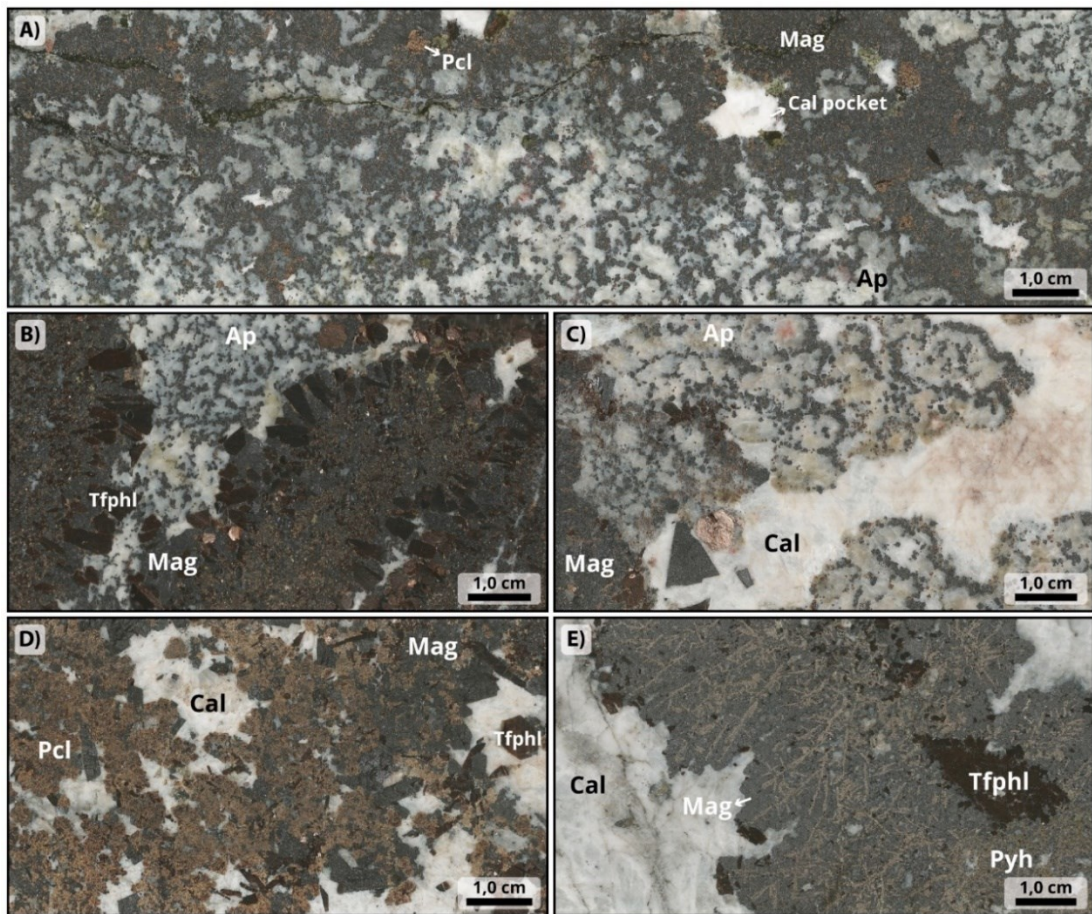


Fig. 2.15 Apatita foscrito: A) Variedade típica de granulação média formada por mosaico granular de apatita, magnetita, pirocloro e *pockets* de calcita; B) Apatita foscrito intergranular entre domínios de tetraferrihogopita foscrito; C) Cumulados de apatita foscrito entre *pockets* de calcita. **Texturas peculiares:** D) Domínio marcado pela acumulação de cristais de pirocloro; E) Intercrescimento dendrítico marcada por uma porção central com pirrotita e bordas de magnetita.

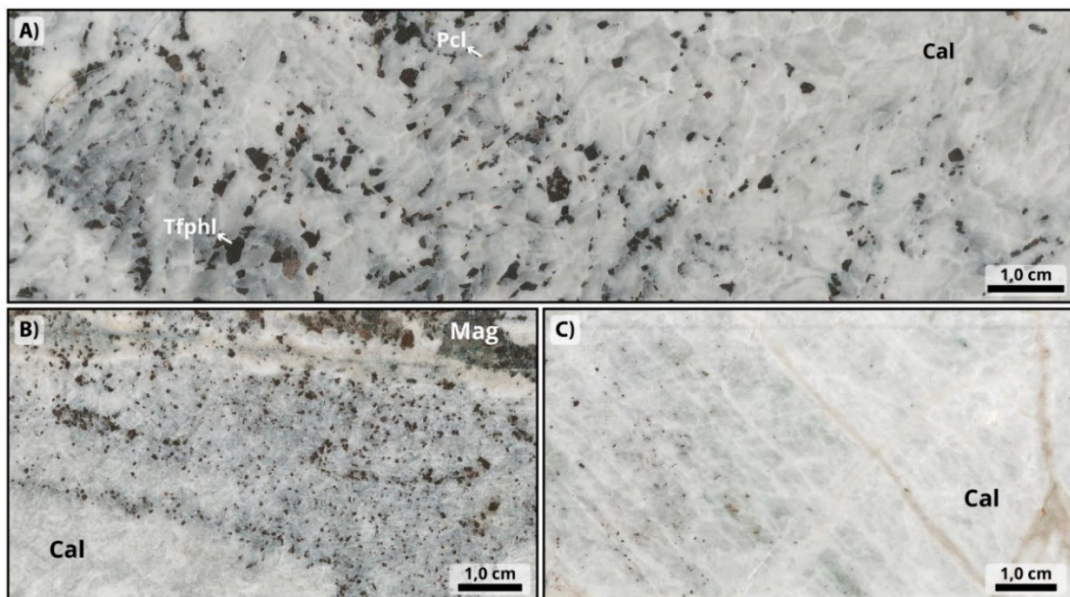


Fig. 2.16 Tetraferrihogopita calcita carbonatito: A) Variedade de granulação média grossa formada por agregado granular de calcita, tetraferrihogopita, magnetita, apatita e menor pirocloro. B) Amostra de granulação fina com tetraferrihogopita e magnetita disseminados. C) Variedade com aspecto branco e homogêneo, com baixa proporção em minerais não carbonáticos. **Abreviações:** Ap – apatita, Cal – calcita, Mag – magnetita, Pcl – pirocloro, Pyh – pirrotita e Tfphl – tetraferrihogopita.

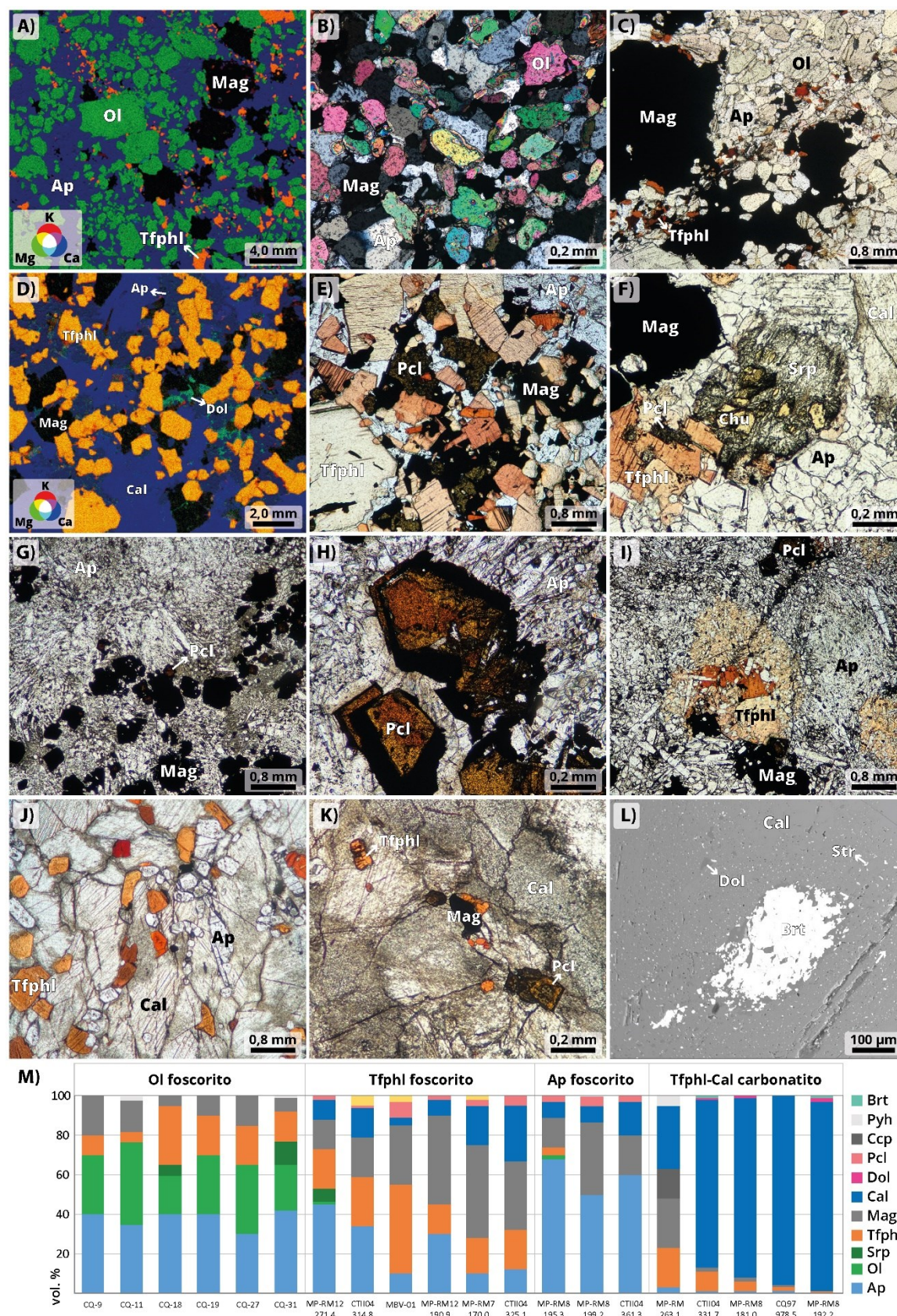


Fig. 2.17 Olivina foscrito: A) Mapa multi-elementar por micro-XRF (Mg-K-Ca) ilustrando textura granular composta por olivina, apatita e magnetita; B) Cristais subédricos de olivina em granulação fina; C) Magnetita intergranular englobando cristais de olivina e apatita. **Tetraferrihogopita foscrito:** D) Mapa multi-elementar por micro-XRF (Mg-K-Ca) ilustrando textura granular composta por tetraferrihogopita, apatita, magnetita e calcita intersticial; E) Magnetita intergranular entre cristais de tetraferrihogopita e apatita; F) Pseudomorfo de olivina transformado em serpentina e clinohumita. **Apatita**

foscorito: G) Textura granular composta por apatita, magnetita e menor pirocloro, com calcita intersticial; **H)** Cristais euédricos e zonados de pirocloro; **D)** Tetraferroflogopita com abundantes inclusões de apatita. **Tetraferroflogopita calcita carbonatito: J)** Textura granular composta por calcita, tetraferroflogopita e apatita; **K)** Cristal subédrico de pirocloro; **L)** Imagem de elétrons retroespalhados por microscopia eletrônica ilustrando dolomita e barita intergranulares entre cristais de calcita com exsoluções finas de estroncianita. **Abreviações:** Ap – apatita, Brt – barita, Cal – calcita, Ccp – calcopirita, Chu – clinohumita, Dol – dolomita, Mag – magnetita, Ol – olivina, Pel – pirocloro, Pyh – pirrotita, Srp – serpentina, Str – estroncianita e Tfphl – tetraferroflogopita.

2.2.5 ESTÁGIO V

O quinto estágio intrusivo é formado por carbonatitos tardios sem associação espacial direta com um correspondente ultramáfico. Diques e veios de dolomita carbonatitos são intrusivos sobre bebedouritos, foscoritos e calcita carbonatitos por toda a área no domínio norte. *Stock* com até 200 m ocorre no domínio sul na área da Mina Boa Vista (**Fig. 2.2**), embora diques e veios também ocorram dispersos de forma periférica a esse *stock* principal. O carbonato dominante nesse estágio é tipicamente dolomita em solução sólida para ferrodolomita e ankerita.

Ao menos duas fácies são reconhecidas com base no tipo de carbonato presente como dolomita carbonatito e ferro-dolomita carbonatito. Calcita, norsethita, baritocalcita, barita, estroncianita e carbonatos de terras raras ocorrem de forma característica. Minerais silicáticos (*i.e.* olivina, clinopiroxênio, flogopita e tetraferroflogopita), apatita e magnetita não estão presentes.

Dolomita carbonatito

O dolomita carbonatito é branco a cinza claro, de granulação média a grossa (**Fig. 2.18A**). A paragênese principal é formada por dolomita como carbonato dominante (> 90 vol.%) e, em menor proporção, calcita, barita e norsethita $[\text{BaMg}(\text{CO}_3)_2]$. A textura é composta por dolomita subédrica a anédrica (1,0-8,0 mm) e cristais intergranulares de calcita (< 0,1-0,3 mm), norsethita (0,1-0,8 mm) e barita (< 0,1 mm; **Fig. 2.19A**). Dolomita é incolor a marrom clara com frequente zonação (**Fig. 2.19B**). Calcita é anédrica e apresenta abundantes exsoluções finas de estroncianita (SrCO_3). Norsethita é subédrica com típico hábito romboédrico e geminação simples (**Fig. 2.19C**). Barita é anédrica e intersticial entre demais cristais.

Pirrotita, pirocloro, anatásio, baritocalcita, estroncianita e carbonatos de terras raras são acessórios. Pirrotita é anédrica como cristais alongados em textura dentrítica (**Fig. 2.18B**). Pirocloro ocorre como raros cristais subédricos a euédricos de granulação fina (< 0,8 mm). Anatásio é caracteristicamente azul claro em amostra de mão e ocorre como cristais finos (< 0,15 mm). Baritocalcita, estroncianita, barita e carbonatos de terras raras ocorrem em associação como agregados de cristais finos (< 0,1 mm) entre os cristais de dolomita (**Fig. 2.19D**). Ancyrita $[\text{Sr}(\text{Ce},\text{La})(\text{CO}_3)_2(\text{OH})\cdot(\text{H}_2\text{O})]$ é o principal carbonato de terras raras identificado nesse estágio.

Ferro-dolomita carbonatito

O ferro-dolomita carbonatito é branco a rosa claro, granulação fina a média e apresenta típica estrutura porosa com *vugs* de dissolução (**Fig. 2.18C**). A rocha é formada por dolomita em solução sólida para ankerita e mais elevada proporção de barita, estroncianita e carbonatos de terras raras (até 30 vol.%; **Fig. 2.18D**). Minerais da solução dolomita-ankerita formam cristais subédricos a anédricos (0,2-2,5 mm; **Fig. 2.19D**). Barita, estroncianita e carbonatos de terras raras são intergranulares. Barita forma cristais anédricos a subédricos (0,1-0,5 mm). Estroncianita e os carbonatos de terras raras são anédricos em agregados finos (< 0,2 mm; **Fig. 2.19E**). Os principais carbonatos de terras raras identificados são carbocernaita $[(Ca,Na)(Sr,Ce,Ba)(CO_3)_2]$, qaqarssukita $[Ba(Ce,REE)(CO_3)_2F]$ e ancylita $[Sr(Ce,La)(CO_3)_2(OH)\cdot(H_2O)]$. Zhonghuacerita $[Ba_2Ce(CO_3)_3F]$ ocorre de forma localizada.

Minerais acessórios comuns são pirita e galena, como cristais euédricos a subédricos em típico hábito cubico (0,2-0,5 mm; **Fig. 2.18E**). De forma mais restrita, silicato de K, Nb e Ti foi identificado como rippita $[K_2(Nb,Ti)_2(Si_4O_{12})O(O,F)]$. Rippita ocorre como cristais euédricos de granulação fina (0,05-0,2 mm) e com hábito prismático (**Fig. 2.19F**). Quartzo é o principal mineral secundário e ocorre em algumas porções sobrepondo a trama magmática como preenchimentos intersticiais e sobre as porosidades em ambas as fácies do dolomita carbonatitos.

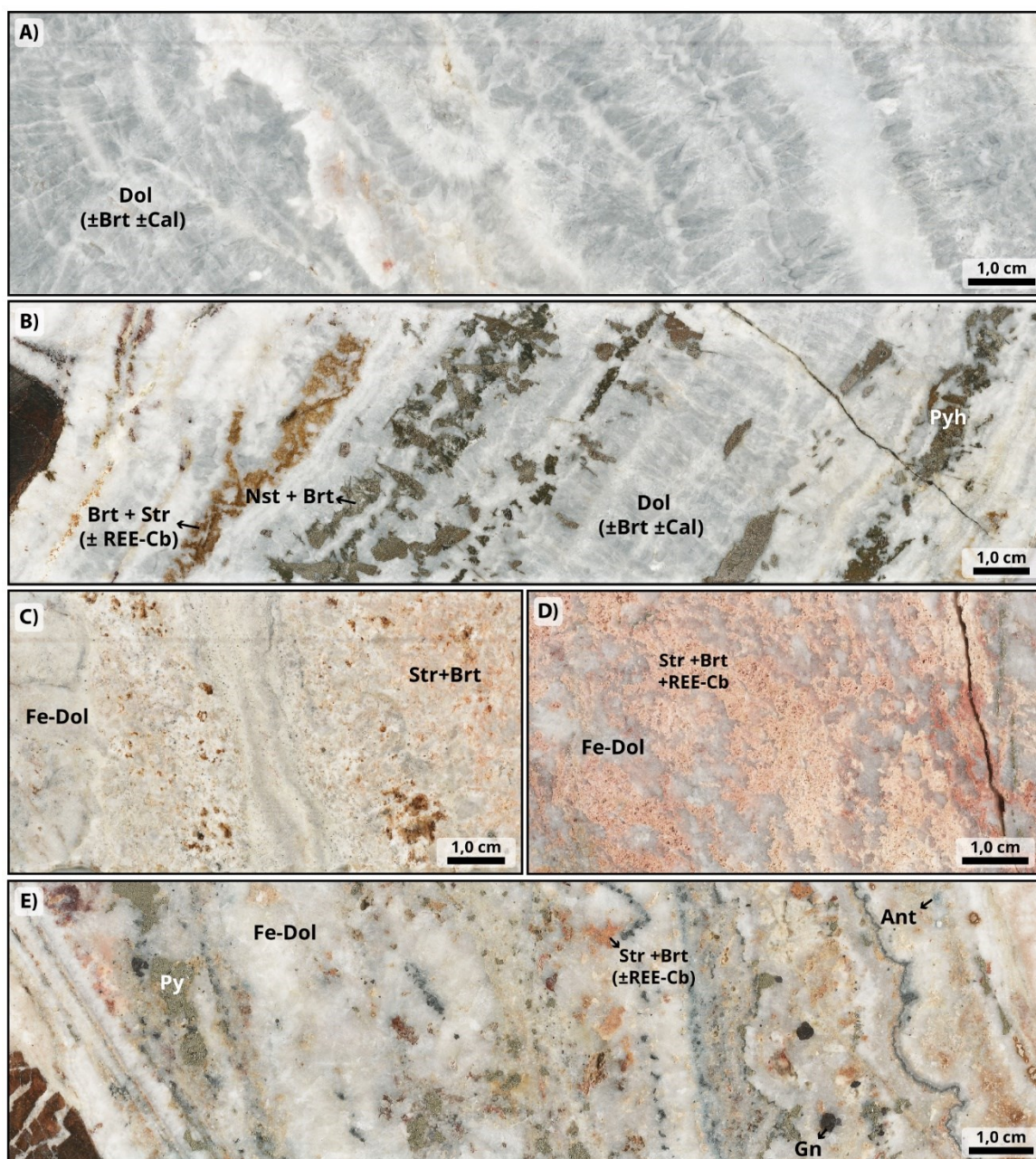


Fig. 2.18 Dolomita carbonatito: **A)** Fácies de cor branca e estrutura maciça; **B)** Variedade com estrutura bandada e cristais dentrícticos de pirrotita e pirita. **Ferro-dolomita carbonatito:** **C)** Amostra com típica estrutura porosa e *vugs* de dissolução; **D)** Variedade rosada com alta proporção em barita, estroncianita e carbonatos de terras raras; **E)** Variedade bandada com cristais de pirita e galena. **Abreviações:** Ant – anatásio, Brt – barita, Cal – calcita, Dol – dolomita, Fe- Dol – ferro-dolomita, Gn – galena, Nst – norsethita, Py – pirita, Pyh – pirrotita, REE-Cb – carbonatos de terras raras e Str – estroncianita.

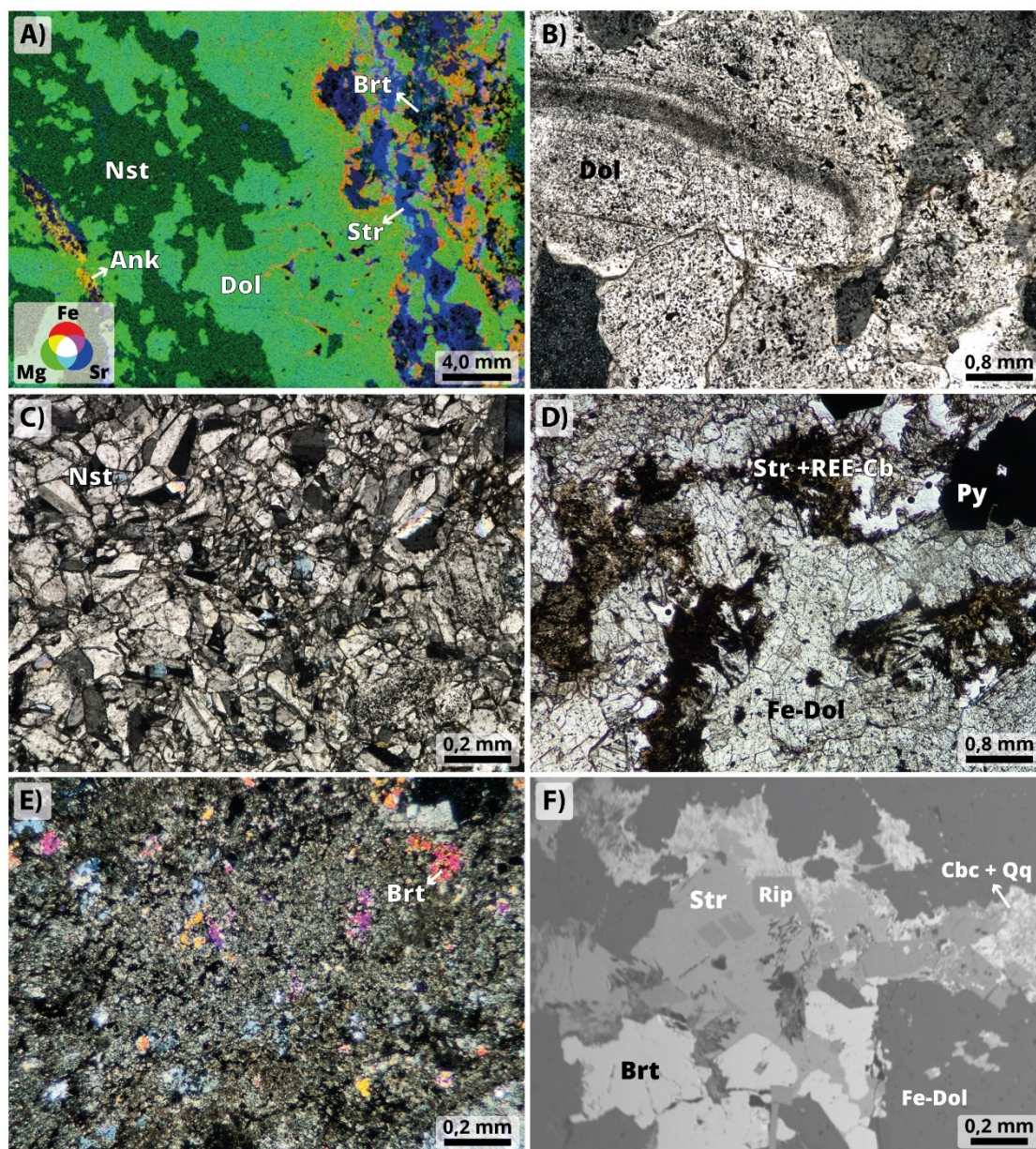


Fig. 2.19 Dolomita carbonatito: **A)** Mapa multi-elementar por micro-XRF (Fe-Mg-Sr) ilustrando dolomita e norsethita granulares, e domínios intersticiais preenchidos por agregados finos de barita e estroncianita; **B)** Cristais de dolomita zonados com aspecto turvo pela presença de micro-inclusões; **C)** Norsethita em cristais euédricos. **Ferro-dolomita carbonatito:** **D)** Cristais de ferro-dolomita entre domínios intersticiais de barita, estroncianita e carbonatos de terras raras; **E)** Domínio intersticial fino com cristais de barita marcados pela alta birrefringência; **F)** Imagem de elétrons retroespalhados ilustrando cristais de barita, estroncianita, agregados finos de carbocernaita e qaqarssukita, e cristais euédricos de rippita. **Abreviações:** Ank – ankerita, Brt – barita, Cbc – carbocernaita, Dol – dolomita, Fe-Dol – ferro-dolomita, Nst – norsethita, Py – pirita, Qq – qaqarssukita, REE-Cb – carbonatos de terras raras, Rip – rippita e Str – estroncianita.

2.2.6 ESTÁGIO VI

Diques de álcali-feldspato sienito cortam sequências anteriores no domínio norte do Complexo Catalão II. Embora o sienito apresente semelhanças mineralógicas com fenitos encaixantes, distingue-se pela relação de corte, tipo de intrusão como diques e pela textura fanerítica. De forma contrastante, os fenitos ocorrem normalmente como xenólitos cortados por venulações tardias e apresentam aspectos remanescentes da foliação metamórfica regional. A distribuição dos diques de sienito é restrita a porções mais centrais do domínio norte e em escala não mapeável. Dimensão dos diques varia em torno de 10 a 50 cm.

Álcali-feldspato sienito

O álcali-feldspato sienito é maciço, bege a cinza claro, de granulação média a grossa e leucocrático (**Fig. 2.20A-B**). A rocha é composta por ortoclásio (70-85 vol.%), biotita (10-25 vol.%) e calcita (2-5 vol.%). A textura é granular formada por cristais subédricos de ortoclásio (0,5-6,0 mm), a intergranular em domínios com maior proporção em biotita (**Fig. 2.21A**). O ortoclásio é tabular, apresenta frequente geminação *Carlsbad*, com inclusões localizadas de biotita e apatita (**Fig. 2.21B**). Intercrescimentos pertíticos não foram opticamente reconhecidos. Lamelas de biotita são subédricas a anédricas (0,1-2,5 mm), com pleocroísmo normal ($\alpha < \beta = \gamma$; α = castanho avermelhado; β e γ = castanho escuro). Calcita é intersticial, por vezes em concentrações que configuram pequenos *pockets* com alguns centimétricos de dimensão (< 2,0 cm; **Fig. 2.20C**).

Em menor proporção, zircão, apatita, ilmenita e dalyita são acessórios. Zircão é subédrico (0,2-1,2 mm) e apresenta caracteristicamente cor castanha clara (**Fig. 2.21C**). Em algumas porções, zircão forma agregados finos (< 0,1 mm) em associação com carbonatos. Apatita é subédrica com hábito prismático (0,1-0,2 mm) e ocorre comumente como inclusão em cristais de ortoclásio. Ilmenita é subédrica a anédrica (0,2-0,8 mm). Raro cristal de dalyita ($K_2ZrSi_6O_{15}$) ocorre em fácies do sienito marcadas pela menor proporção modal de biotita (< 10 vol.%). Dalyita é intersticial, apresenta aspecto incolor, forma anédrica e birrefringência elevada em cores de quarta ordem (**Fig. 2.21D**).

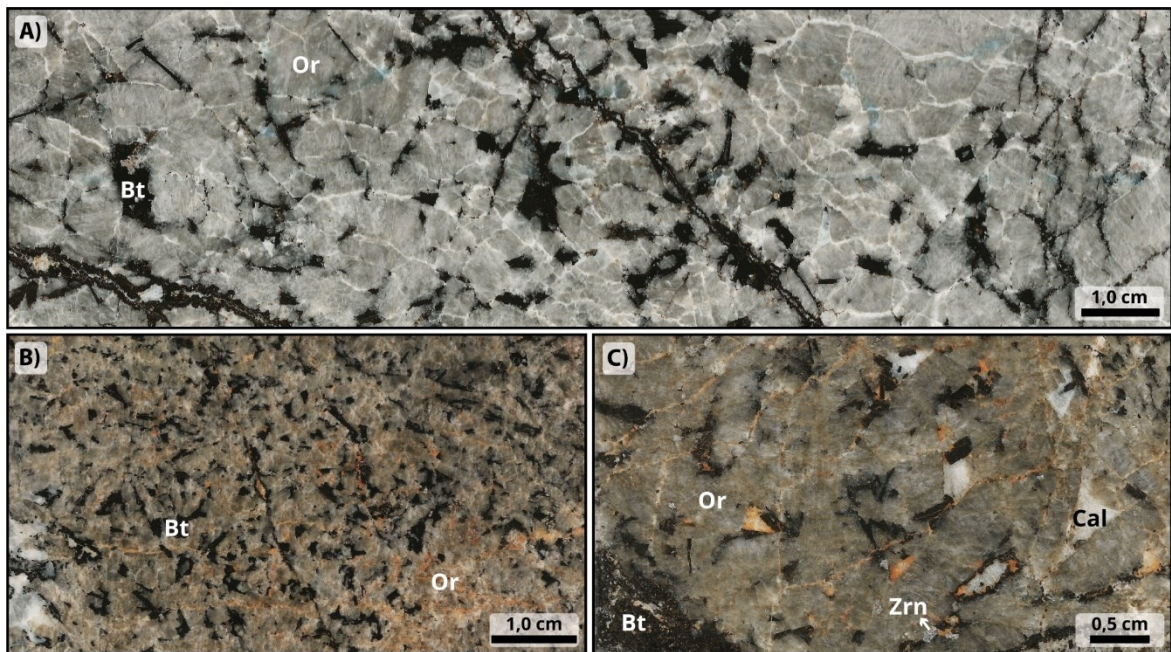


Fig. 2.20 Álcali-feldspato sienito: A) Variedade cinza claro, com textura granular; B) Fácies do sienito de granulação média; C) Calcita de forma intersticial entre cristais grossos de ortoclásio.

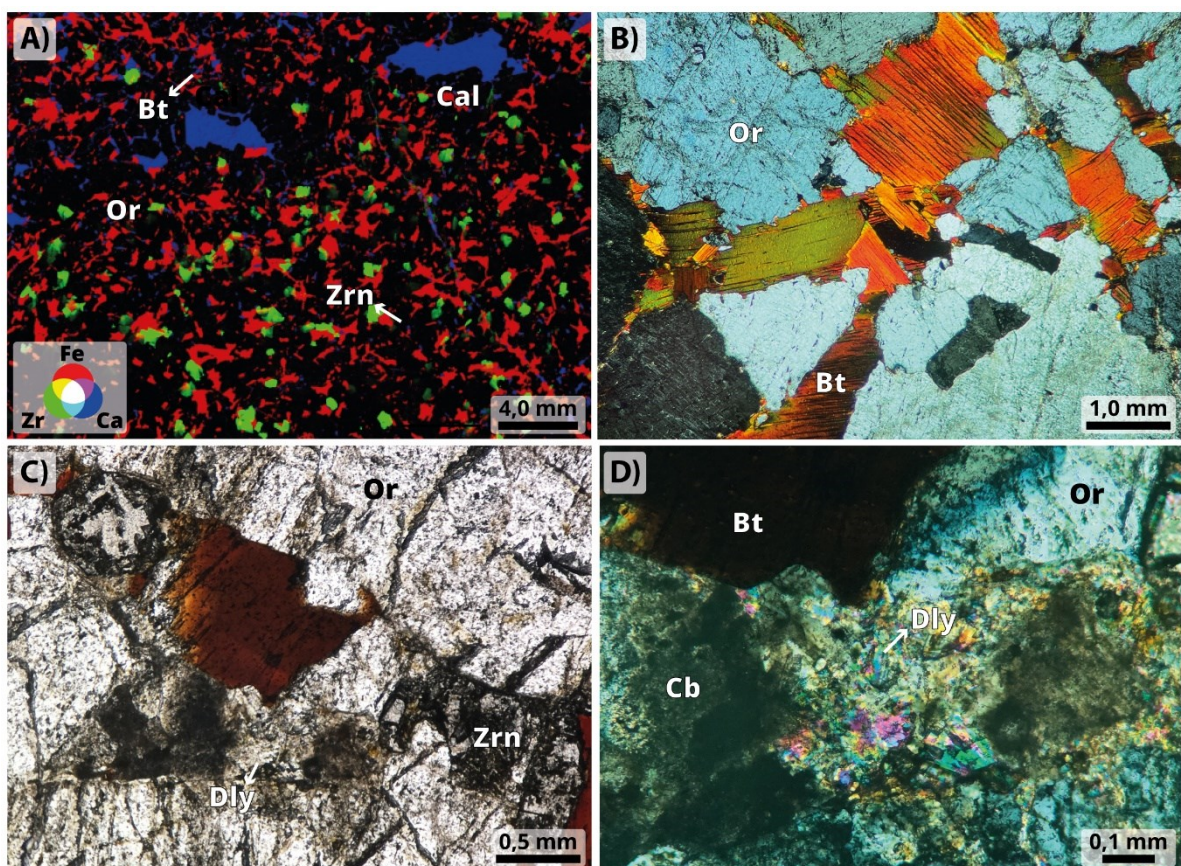


Fig. 2.21 Álcali-feldspato sienito: A) Mapa multi-elementar por micro-XRF (Fe-Zr-Ca) em domínio com abundância em biotita e zircão intersticiais; B) Textura granular composta por cristais tabulares de ortoclásio; C) Cristais subédricos de zircão; D) Dalyita em agregado intersticial. **Abreviações:** Bt – biotita, Cal – calcita, Cb – carbonato, Dly – dalyita, Or – ortoclásio e Zrn – zircão.

2.2.7 ESTÁGIO VII

Diques ultramáficos subvulcânicos são denominados como flogopita picrito em trabalhos anteriores nos complexos alcalinos da Província Ígnea do Alto Paranaíba (Gibson *et al.*, 1995 e referências seguintes). No entanto, a nomenclatura mais recente de lamprófiros ultramáficos como proposta por Tappe *et al.* (2005) será adotada neste trabalho. Dessa forma, rochas anteriormente descritas como flogopita picrito serão referidas como olivina aillikito.

O olivina aillikito apresenta uma área de distribuição ampla em ambos domínios do complexo (**Fig. 2.1**). Forma e tipo de intrusão é variável, ocorrendo como veios, diques, *plugs* e *pipes*. Sobreposição por diques ou veios posteriores não é observada, exceto por venulações finas de carbonatos tardios. Tendo em vista a correlação temporal por relação de corte, o olivina aillikito representa o último estágio intrusivo no Complexo Catalão II.

Olivina aillikito

O olivina aillikito é castanho escuro e de granulação fina (**Fig. 2.22A**). Os componentes principais são representados por flogopita (30-40 vol.%), calcita (20-30 vol.%), olivina (15-20 vol.%) e minerais do grupo do espinélio (*i.e.* cromita e magnetita; até 5 vol.%). A textura é inequigranular (**Fig. 2.23A**) formada por macrocristais de olivina (15-20 vol.%) e flogopita (5-10 vol.%) e matriz fina composta por flogopita (40-50 vol.%), calcita (30-40 vol.%), espinélios (3-5 vol.%), e acessórios como perovskita e apatita (< 1 vol.%). Olivina forma cristais subédricos a anédricos e frequentemente serpentinizados (0,5-2,5 mm). Flogopita é subédrica (< 0,1-0,2 mm) e, localmente, com bordas sobrecrescidas de tetraferroflogopita. Calcita é intersticial na matriz fina. Espinélios são anédricos e intersticiais (< 0,1 mm). Perovskita é subédrica a anédrica (< 0,1-0,2 mm). Apatita é subédrica prismática (< 0,05 mm). Outros minerais menos acessórios na matriz são melanita e clinopiroxênio.

Texturas peculiares podem ser observadas em algumas porções. Textura *pseudo-fluidal* é caracterizada pela concentração de macrocristais no centro dos diques em relação as bordas. Como consequência, é comum que em um mesmo dique de aillikito ocorra porções com diferentes tonalidades como reflexo da maior ou menor proporção de olivina ou flogopita (**Fig. 2.22B**). Glóbulos milimétricos de calcita com formas arredondadas são estruturas comuns em algumas fácies (**Fig. 2.22C**). Domínios com textura globular apresentam menor proporção em olivina e matriz com flogopita, clinopiroxênio e minerais do grupo do espinélio (**Fig. 2.23B**). De forma mais restrita, brechas ocorrem nas bordas de intrusões mais espessas, como em *stocks* ou *plugs*. Nesse contexto, as brechas são constituídas por uma matriz de aillikito e por xenólitos angulares de encaixantes como carbonatitos, bebedouritos, foscoritos e fenitos (**Fig. 2.22D**).

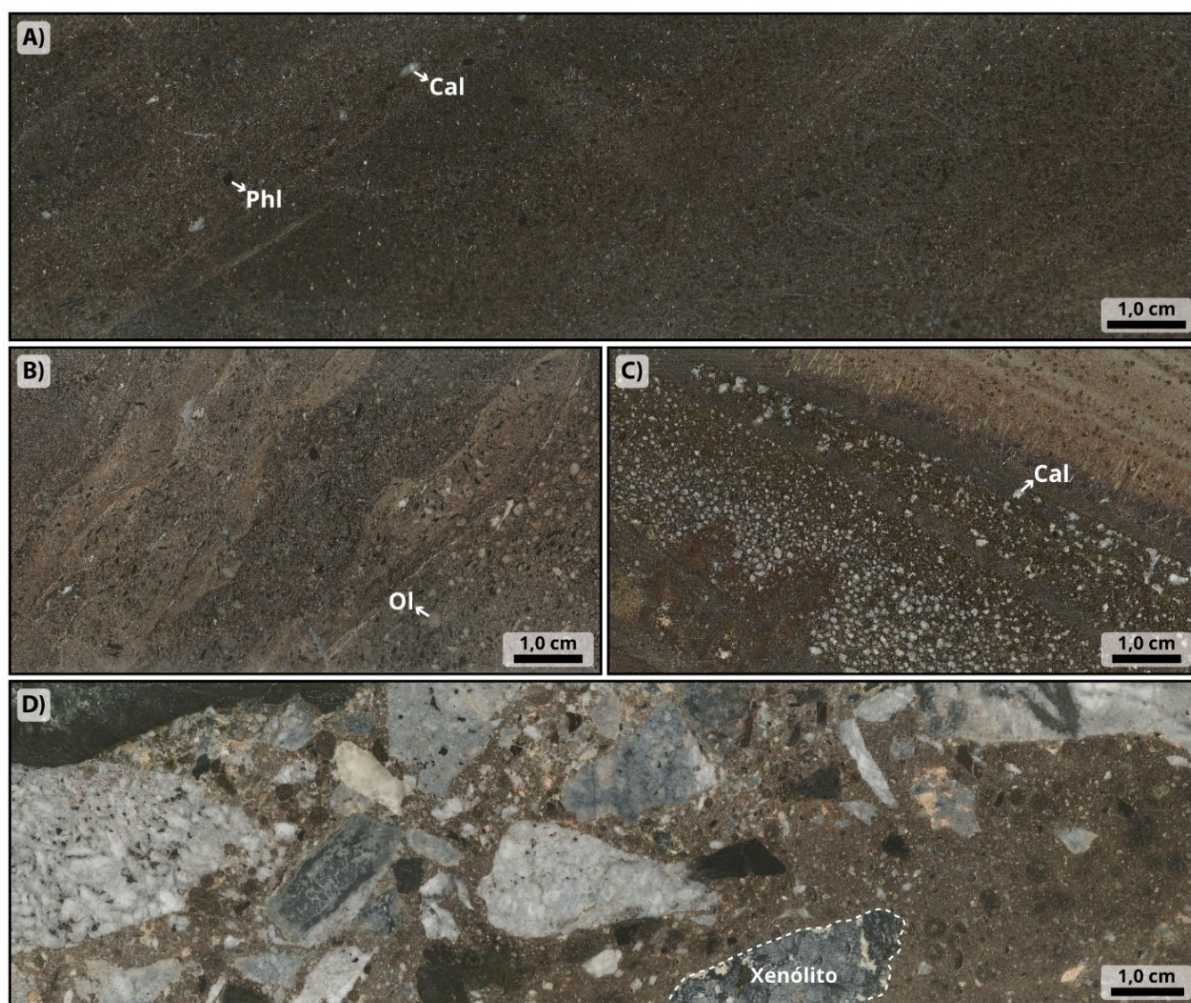


Fig. 2.22 Olivina aillikito: A) Variedade típica de cor castanho escuro e textura inequigranular; B) Porção com textura de fluxo magmático marcada por faixas com colorações distintas; C) Domínio com abundância de glóbulos de calcita; D) Brecha com xenólitos de carbonatito e fenitos.

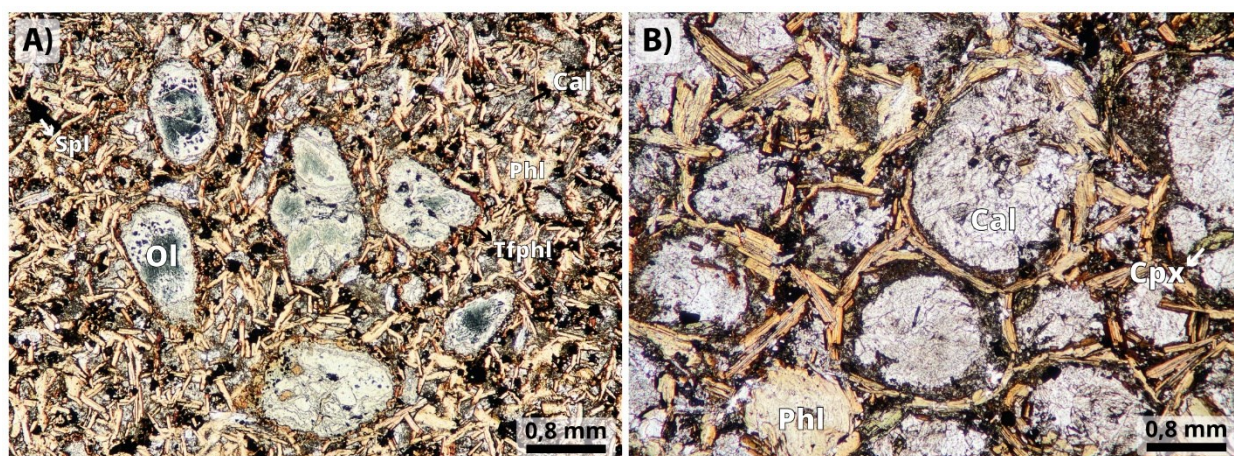


Fig. 2.23 A) Olivina aillikito formado por macrocristais euédricos de olivina e matriz com flogopita, calcita, minerais do grupo do espinélio e, localmente, tetraferroflogopita; **B)** Aillikito com glóbulos de calcita entre matriz fina composta por flogopita, clinopiroxênio e minerais do grupo do espinélio. **Abreviações:** Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Ol – olivina, Phl – flogopita, Spl – minerais do grupo do espinélio e Tfphl – tetraferroflogopita.

2.2.8 FENITOS

Fenitos são rochas formadas a partir da interação de fluidos ricos em álcalis (*i.e.* Na e K) derivados do resfriamento e cristalização de carbonatitos e magmas alcalinos com a encaixante (Le Bas, 2008; Elliott *et al.*, 2018). Xenólitos fenitizados ocorrem de forma frequente na porção norte do Complexo Catalão II. A dimensão dos xenólitos varia de 10 a 50 cm de espessura em furos de sonda. Como feições características, apresentam frequentes venulações e bordas irregulares em configurações que se assemelham com texturas de digestão magmática (**Fig. 2.24**). A composição é representada principalmente por ortoclásio, mas dois subtipos podem ser reconhecidos com base em diferenças na proporção modal dos minerais e no tipo de rocha que abriga o xenólito, sendo biotita-ortoclásio fenito essencialmente quando em contato com carbonatito e clinopiroxênio-ortoclásio fenito quando em contato com bebedourito. A nomenclatura adotada segue recomendações indicadas por Elliott *et al.* (2018). Fenitos da porção sul do complexo, área representada pela Mina Boa Vista, não serão abordados por limitações no acesso ao acervo de amostras.

Biotita ortoclásio fenito

O **biotita ortoclásio fenito** é cinza claro de granulação média a fina composto por ortoclásio (60-80%), biotita (20-30%) e carbonatos (5-10%). Estrutura é maciça, mas localmente podem ser observadas porções com foliação incipiente. Os cristais de ortoclásio são anédricos (0,2-1,0 mm) com formas arredondadas e bordas suaves constituindo uma trama granoblástica (**Fig. 2.25A**). Lamelas de biotita são anédricas e intergranulares (0,1-0,5 mm) com pleocroísmo característico em tons de castanho claro (**Fig. 2.25B**). Carbonatos são intersticiais entre as lamelas de biotita. Zircão é acessório e ocorre como cristais anédricos (<0,2 mm) com frequentes bordas de alteração em contato com carbonatos. Halo de metassomatismo proximal em contato com carbonatito é marcado pelo aumento da proporção de biotita e carbonato (**Fig. 2.24A**).

Clinopiroxênio ortoclásio fenito

O **clinopiroxênio ortoclásio fenito** é cinza esverdeada, de granulação média a fina e estrutura maciça (**Fig. 2.24B-C**). A rocha é constituída por ortoclásio (40-60%), clinopiroxênio (20-40%), anfíbólio (5-15%) e tetraferriflogopita (5-10%). A trama é granoblástica (**Fig. 2.25C**) formada por cristais anédricos de ortoclásio (0,2-1,5 mm), clinopiroxênio (0,2-0,8 mm) e anfíbólio (0,2-0,6 mm). Clinopiroxênio é verde escuro e subédrico a anédrico. Anfíbólio é pleocróico em tons de verde claro a verde azulado. Lamelas de tetraferriflogopita são intergranulares (0,1-0,6 mm) e apresentam pleocroísmo inverso em tons de laranja a laranja avermelhado (**Fig. 2.25D**). Carbonatos são acessórios e intersticiais.

Pelo menos dois halos de metassomatismo podem ser reconhecidos por variações modais na mineralogia de forma proximal ao contato do fenito com o bebedourito (**Fig. 2.24B**). O halo proximal imediatamente no contato é marcado pela formação de tetraferroflogopita. Halo intermediário à borda é constituído por maior proporção de clinopiroxênio e anfibólio. Em algumas porções em que processo de fenitização ocorre de forma mais pervasiva, observa-se maior proporção geral de minerais máficos como ilustrado pela **Fig. 2.24C**.

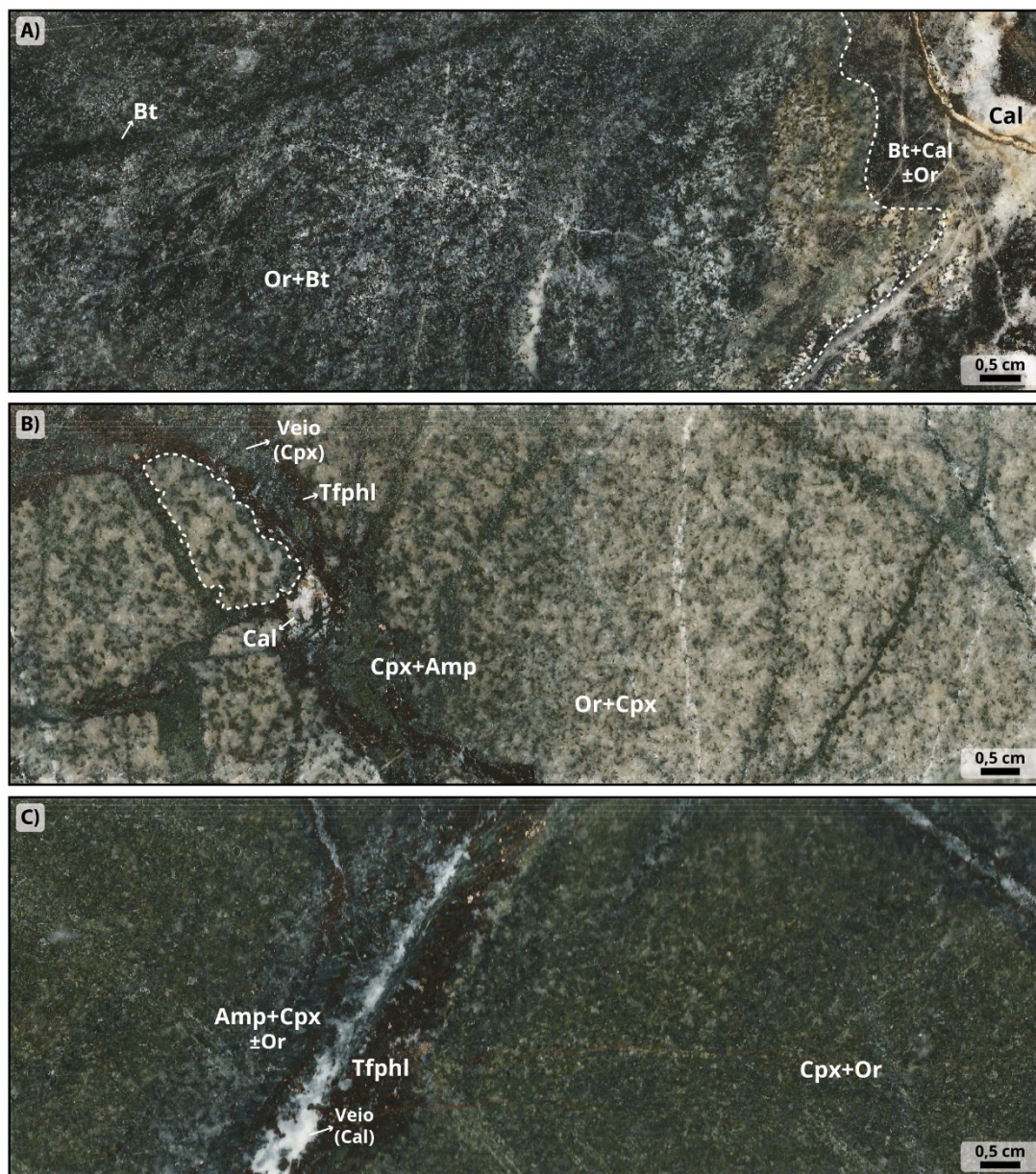


Fig. 2.24 Biotita ortoclásio fenito: A) Amostra de fenito em contato com carbonatito. Linha tracejada mostra contato entre fenito e zona de intensa transformação em biotita de forma proximal ao contato; **Clinopiroxênio ortoclásio fenito:** B) Fragmentos de clinopiroxênio ortoclásio fenito em textura de digestão por bebedourito. Zonação pode ser observada pela maior concentração de clinopiroxênio e anfibólio em direção às bordas e zona com alta proporção em tetraferroflogopita imediatamente em contato com tetraferroflogopita bebedourito; C) Fácies do fenito marcada por intenso metassomatismo com maior proporção em clinopiroxênio e anfibólio. Veios tardios de carbonatito cortam a amostra. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Bt – biotita, Or – ortoclásio e Tfphl – tetraferroflogopita.

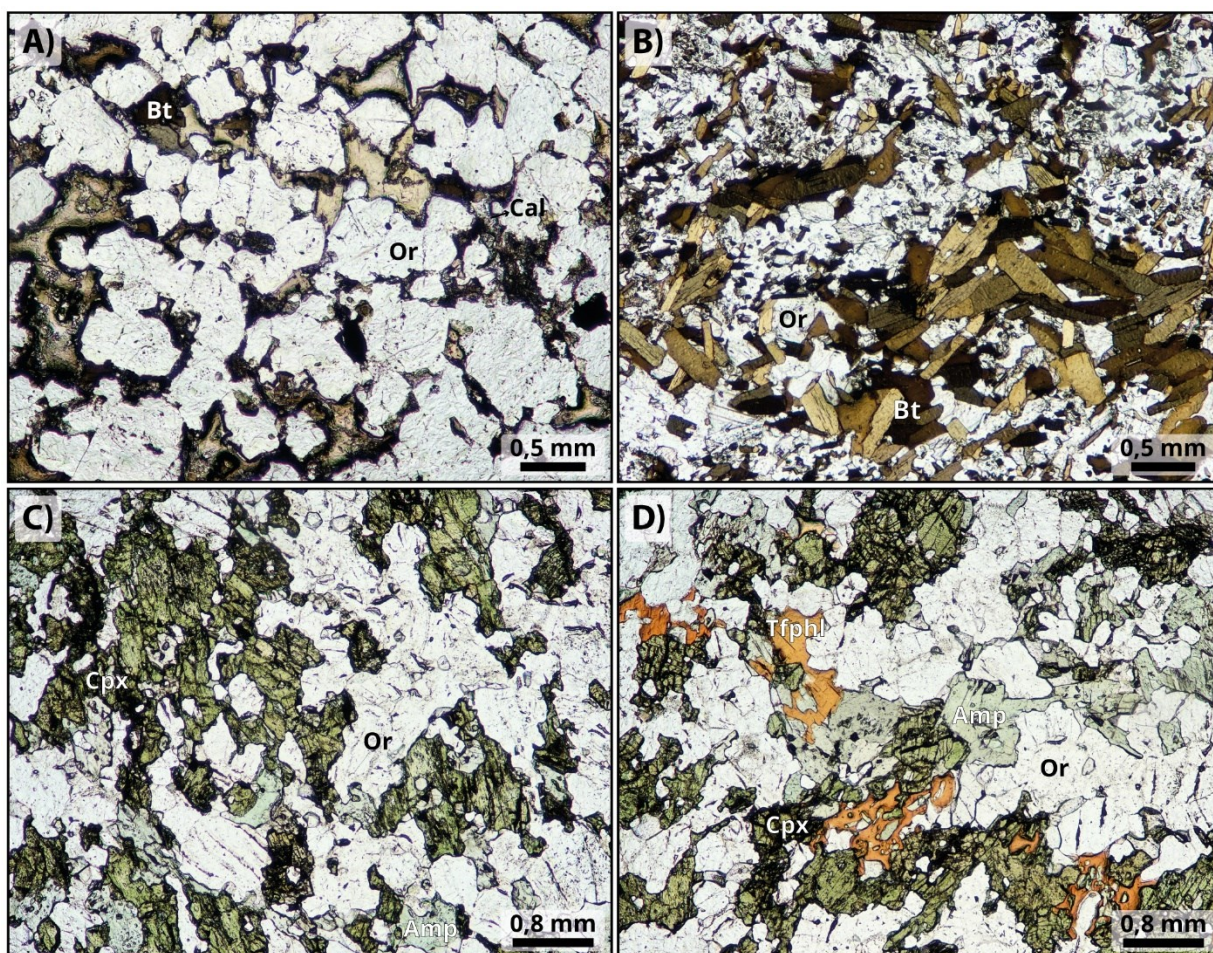


Fig. 2.25 Biotita ortoclásio fenito: A) Textura granoblástica marcada por cristais anédricos de ortoclásio e biotita intergranular; B) Domínio localmente com maior proporção em biotita. **Clinopiroxênio ortoclásio fenito:** C) Textura granoblástica constituída por ortoclásio, clinopiroxênio e anfibólio; D) Tetraferrihogopita acessória de forma intergranular. **Abreviações:** Amp – anfibólio, Cal – calcita, Cpx – clinopiroxênio, Bt – biotita, Or – ortoclásio e Tfphl – tetraferrihogopita.

REFERÊNCIAS

- Albekov, A.Y., Chernyshov, N.M., Ryborak, M.V., Kuznetsov, V.S., Salnikova, E.B. and Kholin, V.M., 2017. March. U–Pb isotopic age of apatite-bearing carbonatites in the Kursk block, Voronezh crystalline massif (central Russia). *Doklady Earth Sciences*, 473, pp. 271-272.
- Anosova, M.O., Kostitsyn, Y.A., Kogarko, L.N., 2019. Correlation of High-Calcium Silica-Undersaturated Complex of the Maymecha–Kotuy Province with Siberian Flood Basalts: New Age Data on the Kugda Massif (Polar Siberia). *Geochemistry International*, 57(12), pp. 1339-1342.
- Araújo, D.P. 1996. Metassomatismo no complexo carbonatítico Catalão I: implicações para a composição do magma carbonatítico e para o metassomatismo carbonatítico do manto superior. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 221 pp.
- Arzamastsev, A.A. & Wu, F.Y., 2014. U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopic systematics of minerals from the ultrabasic-alkaline massifs of the Kola province. *Petrology*, 22(5), pp. 462-479.
- Balaganskaya, E., Downes, H., Demaiffe, D., 2007. REE and Sr-Nd isotope compositions of clinopyroxenites, phoscorites and carbonatites of the Seblyavr massif, Kola peninsula, Russia. *Mineralogia*, 38(1), pp. 29-45.
- Barbosa, O., Braun, O.P.G., Dyer, R.C., Cunha, C.A.B., 1970. Geologia da Região do Triângulo Mineiro. In: *Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral*, pp. 136.
- Barbosa, E.S.R., Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Dantas, E.L., Cordeiro, P.F.O., Gomide, C.S., 2012. Bebedourite from its type area (Salitre I complex): A key petrogenetic series in the Late-Cretaceous Alto Paranaíba kamafugite–carbonatite–phoscorite association, central Brazil. *Lithos*, 144, pp. 56-72.
- Barbosa, E.S.R., Brod, J.A., Cordeiro, P.F.O., Junqueira-Brod, T.C., Santos, R.V., Dantas, E.L., 2020. Phoscorites of the Salitre I complex: Origin and petrogenetic implications. *Chemical Geology*, 535, pp. 119463.
- Basu, N.K. & Mayila, A., 1986. Petrographic and chemical characteristics of the Panda Hill carbonatite complex, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences*, 5(6), pp. 589-598.
- Beccaluva L., Barbieri M., Born H., Brotzu P., Coltorti M., Conte A., Garbarino C., Gomes C.B., Macciotta G., Morbidelli L., Ruberti E., Siena F., Traversa G., 1992. Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquiá (São Paulo, Brazil). *Journal of Petrology*, 33(6), pp. 1371-1404.
- Bell, K., 1998. Radiogenic isotope constraints on relationships between carbonatites and associated silicate rocks – a brief review. *Journal of Petrology*, 39, pp. 1987-1996.
- Bell, K. & Dunworth, E.A., Bulakh, A.G., Ivanikov, V.V., 1996. Alkaline rocks of the Turiy Peninsula, Russia, including type-locality turjaite and turjite; a review. *The Canadian Mineralogist*, 34(2), pp. 265-280.
- Brasil, 2021. Decreto nº 10.991, de 11 de março de 2022. Institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022–2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos, Brasília.
- Brigatti, M.F., Medici, L., Saccani, E., Vaccaro, C., 1996. Crystal chemistry and petrologic significance of Fe³⁺-rich phlogopite from the Tapira carbonatite complex, Brazil. *American Mineralogist*, 81(7-8), pp. 913-927.

- Brigatti, M.F., Malferrari, D., Medici, L., Ottolini, L., Poppi, L., 2004. Crystal chemistry of apatites from the Tapira carbonatite complex, Brazil. *European Journal of Mineralogy*, 16(4), pp. 677-685.
- Brod, J.A., 1999. Petrology and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais State, Brazil. Unpublished Ph.D. Thesis, Durham University, England, 500 pp.
- Brod, J.A., Gibson, S.A., Thompson, R.N., Junqueira-Brod, T.C., Seer, H.J., Moraes, L.D., Boaventura, G.R., 2000. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP) southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3), pp.408-412.
- Brod, J.A., Ribeiro, C.C., Gaspar, J.C., Junqueira-Brod, T.C., Barbosa, E.S.R., Riffel, B.F., Silva, J.F., Chaban, N., Ferrarri, A.J.D., 2004. Geologia e mineralizações dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. In: 42º Congresso Brasileiro de Geociências, Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalino-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Field Trip Guide, 29 pp.
- Brod, J.A., Gaspar, J.C., Diniz-Pinto, H.S., Junqueira-Brod, T.C., 2005. Spinel chemistry and petrogenetic processes in the Tapira alkaline-carbonatite complex, Minas Gerais, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 35(1), pp.23-32.
- Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Gaspar, J.C., Petrinovic, I.A., Castro Valente, S., Corval, A., 2013. Decoupling of paired elements, crossover REE patterns, and mirrored spider diagrams: Fingerprinting liquid immiscibility in the Tapira alkaline-carbonatite complex, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 41, pp. 41-56.
- Carvalho, W.T., 1974. Aspectos geológicos e petrográficos do complexo ultramáfico-alcalino de Catalão I, GO. In: Anais do 28º Congresso Brasileiro de Geologia, vol. 5, Porto Alegre, Brasil. pp. 107-123.
- Carvalho, W.T. & Bressan, S.R., 1981. Depósitos minerais associados ao Complexo ultramáfico-alcalino de Catalão I – Goiás. In Schmaltz, W.H. (Eds.), Os principais depósitos minerais da Região Centro Oeste. Brasília: DNPM, pp. 139-183.
- Chakhmouradian, A.R., Reguir, E.P., Kressall, R.D., Crozier, J., Pisiak, L.K., Sidhu, R., Yang, P., 2015. Carbonatite-hosted niobium deposit at Aley, northern British Columbia (Canada): Mineralogy, geochemistry and petrogenesis. *Ore Geology Reviews*, 64, pp. 642-666.
- Chmyz, L., Arnaud, N., Biondi, J.C., Azzone, R.G., Bosch, D., 2019. Hf-Pb isotope and trace element constraints on the origin of the Jacupiranga Complex (Brazil): Insights into carbonatite genesis and multi-stage metasomatism of the lithospheric mantle. *Gondwana Research*, 71, pp.16-27.
- Cordeiro, P.F., Brod, J.A., Dantas, E.L., Barbosa, E.S.R., 2010. Mineral chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil. *Lithos*, 118(3-4), pp. 223-237.
- CMOC Group Limited, 2022. 2022 Annual Report, Resources and Reserves, pp. 44-46.
- Doroshkevich, A.G., Veksler, I.V., Klemm, R., Khromova, E.A., Izbrodin, I.A., 2017. Trace-element composition of minerals and rocks in the Belaya Zima carbonatite complex (Russia): Implications for the mechanisms of magma evolution and carbonatite formation. *Lithos*, 284, pp. 91-108.
- Eriksson, S.C., 1982. Aspects of the petrochemistry of the Phalaborwa complex, northeastern Transvaal, South Africa. Unpublished Ph.D. Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg, 496 pp.
- Fonseca, D.S., 2018. Fosfato. In: Dalla Costa, M.M., Medeiros, K. A., Lima, T.M., (Eds.), Sumário Mineral Brasileiro, Agência Nacional de Mineração, Brasília, pp. 117-119.

- Furtado, S.M.A., Gomes, C.B., Scheibe, L.F., 1986. Ocorrência de foscoritos no Maciço Alcalino de Anitápolis, SC. In: Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Vol. 4, pp. 1604-1614.
- Furtado, S.M.A., 1989. Petrologia do Maciço Alcalino de Anitápolis, SC. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociência, 264 pp.
- Ghobadi, M., Gerdes, A., Kogarko, L., Hoefer, H., Brey, G., 2018. In situ LA-ICPMS isotopic and geochronological studies on carbonatites and phoscorites from the Guli Massif, Maymecha-Kotuy, Polar Siberia. *Geochemistry International*, 56(8), pp. 766-783.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P., Mitchell, J.G., 1995. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. *Journal of Petrology*, 36(1), pp.189-229.
- Gierth, E. & Baecker, M.L., 1986. A mineralização de nióbio e as rochas alcalinas associadas no complexo Catalão I, Goiás. In: Schobbenhaus C. (Eds.), Principais depósitos minerais do Brasil: MME/DNPM 2, Brasília, pp. 455-462.
- Gittins J. & Harmer R.E., 2003. Myth and reality in the carbonatite–silicate rock “association”. *Periodico di Mineralogia*, 72(1), pp. 19-26.
- Glagolev, A.A., Korchagin, A.M., Kharchenkov, A.G., 1974. Arbarastakh and Inagli Alkaline-Ultrabasic Massifs. Nauka, Moscow, 175 pp. (in Russian).
- Gomide, C.S., 2011. Isótopos de enxofre de complexos alcalino-carbonatíticos na margem da bacia do paraná - Goiás, Minas Gerais e São Paulo. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 73 pp.
- Gomide, C.S., Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Buhn, B.M., Santos, R.V., Barbosa, E.S.R., Cordeiro, P.F.O., Palmieri, M., Grasso, C.B., Torres, M.G., 2013. Sulfur isotopes from Brazilian alkaline carbonatite complexes. *Chemical Geology*, 341, pp. 38-49.
- Gomide, C.S., 2015. Geoquímica e química mineral de carbonatitos e isótopos estáveis em carbonatitos da província ígnea do alto Paranaíba. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 253 pp.
- Gomide, C.S., Brod, J.A., Vieira, L.C., Junqueira-Brod, T.C., Petrinovic, I.A., Santos, R.V., Barbosa, E.S.R., Mancini, L.H., 2016. Stable (C, O, S) isotopes and whole-rock geochemistry of carbonatites from Alto Paranaíba Igneous Province, SE Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 46, pp. 351-376.
- Grasso C.B., 2010. Petrologia do complexo alcalino-carbonatítico de Serra Negra, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 156 pp.
- Guarino, V., Wu, F.Y., Lustrino, M., Melluso, L., Brotzu, P., Gomes, C.B., Ruberti, E., Tassinari, C.C.G., Svisero, D.P., 2013. U-Pb ages, Sr-Nd isotope geochemistry, and petrogenesis of kimberlites, kamafugites and phlogopite-picrites of the Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil. *Chemical Geology*, 353, pp. 65-82.
- Guarino, V., Wu, F.Y., Melluso, L., Gomes, C.B., Tassinari, C.C.G., Ruberti, E., Brilli, M., 2016. U–Pb ages, geochemistry, C–O–Nd–Sr–Hf isotopes and petrogenesis of the Catalão II carbonatitic complex (Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil): implications for regional-scale heterogeneities in the Brazilian carbonatite associations. *International Journal of Earth Sciences*, 106, pp.1963-1989.
- Guarino, V. & Brigatti, M.F., 2018. Crystallization conditions of micas in oxidized igneous systems. *American Mineralogist*, 103(12), pp.1999-2010.

- Heinrich, E.W., 1970. The Palabora carbonatitic complex; a unique copper deposit. *The Canadian Mineralogist*, 10(3), pp.585-598.
- Issa Filho, A., Lima P.R.A.S., Souza O.M., 1984. Aspectos da geologia do complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil. In: Rodriques, C.S. and Lima, P.R.A.S (Eds.), *Complexos Carbonatíticos do Brasil*, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração - CBMM, São Paulo, pp. 20-44.
- Johnson, R.L., 1961. The geology of the Dorowa and Shawa carbonatite complexes, Southern Rhodesia. *South African Journal of Geology*, 64(1), pp. 101-46.
- Karchevsky, P.I. & Moutte J., 2004. The phoscorite-carbonatite complex of Vuoriyarvi, northern Karelia. In: Wall, F. and Zaitsev A.N. (Eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, pp. 163-199.
- Kogarko, L.N., Kononova, V.A., Orlova M.P., Woolley A.R., 1995. *Alkaline Rocks and Carbonatites of the World: Part 2. Former USSR*. Chapman and Hall, London, 226 pp.
- Kogarko, L.N., 2018. Geochemistry and Fractionation of Zr and Hf in the Magmatic System of the Kugda Massif (Polar Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 482(1), 1165-1167.
- Kolker, A., 1982. Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis. *Economic Geology*, 77(5), pp. 1146-1158.
- Krasnova, N.Y.I., 2001. The Kovdor phlogopite deposit, Kola Peninsula, Russia. *The Canadian Mineralogist*, 39(1), pp. 33-44.
- Krasnova, N.I., Petrov, T.G., Balaganskaya, E.G., Garcia, D., Moutte, D., Zaitsev, A.N., Wall, F., 2004a. Introduction to phoscorites: occurrence, composition, nomenclature and petrogenesis. In: Wall, F. and Zaitsev A.N. (Eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, pp. 45-79.
- Krasnova, N.I., Balaganskaya, E.G., Garcia, D., 2004b. Kovdor – classic phoscorites and carbonatites. In: Wall, F. and Zaitsev A.N. (Eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, pp. 99-132.
- Laurent, O. & Zeh, A., 2015. A linear Hf isotope-age array despite different granitoid sources and complex Archean geodynamics: Example from the Pietersburg block (South Africa). *Earth and Planetary Science Letters*, 430, pp. 326-338.
- Le Bas, M.J., 1987. Nephelinites and carbonatites. Geological Society, London, Special Publications, 30(1), pp. 53-83.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., 2002. *Igneous rocks. A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Legler C., Barth A., Knobloch A., Mruma A.H., Myumbilwa Y., Magigita M., Msechu M., Ngole T., Stanek K.-P., Falk D., Stephan T., 2015. *Minerogenic Map of Tanzania and Explanatory Notes for the Minerogenic Map of Tanzania*. Geological Survey of Tanzania, 376 pp.

- Lloyd, F.E. & Bailey, D.K., 1991. Complex mineral textures in bebedourite: possible links with alkali clinopyroxenite xenoliths and kamafugitic volcanism. 5th International Kimberlite Conference, Araxá. Abstracts. pp. 263-269.
- Luciano, R.L., 2016. Petrografia e geoquímica das rochas metacarbonatíticas do Complexo Angico dos Dias, divisa Bahia/Piauí, Brasil. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 217 pp.
- Lubala, R.T., Frick, C., Rogers, J.H., Walraven, F., 1994. Petrogenesis of Syenites and Granites of the Schiel Alkaline Complex, Northern Transvaal, South Africa. *The Journal of Geology*, 102(3), pp. 307-316.
- Machado Júnior, D.L., 1991. Geologia e aspectos metalogenéticos do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão II (GO). Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. 95 pp.
- Machado Júnior, D.L., 1992. Idades Rb/Sr do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão II (GO). *Anais do 37º Congresso Brasileiro de Geologia - SBG/SP*, São Paulo (SP), pp. 91-93.
- Mariano, A.N. & Marchetto, M., 1991. Serra Negra and Salitre carbonatite alkaline igneous complex. 5th International Kimberlite Conference, Araxá. Abstracts. pp. 75-79.
- Melo, M.V.L.C., 1999. Química dos minerais das rochas do Complexo Carbonatítico de Catalão II: Implicações Petrogenéticas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 232 pp.
- Mitchell, R.H. & Bergman, S.C., 1991. *Petrology of Lamproites*. Plenum Press, New York.
- Mitchell, R.H., 1995. *Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks*. Plenum Press, New York, 410 pp.
- Mitchell, R.H., 1997. *Kimberlites, Orangeites, Lamproites, Melilitites and Minettes: A Petrographic Atlas*. Almaz Press, Thunder Bay. 234 pp.
- Mitchell, R.H., 2005. Carbonatites and carbonatites and carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, 43(6), pp. 2049-2068.
- Mitchell, R.H., 2015. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. *Ore Geology Reviews*, 64, pp. 626-641.
- Mitchell, R.H. & Gittins, J., 2022. Carbonatites and carbothermalites: A revised classification. *Lithos*, 430, pp. 106861.
- Morbidelli, L., Beccaluva, L., Brotzu, P., Conte, A.M., Garbarinos, C., Gomes, C.B., Grossi-Sad, J.H., Riffel, B.F., Ruberti, E., Traversa, G., 1995. Aspectos mineralógicos e petrográficos de rochas ultramáficas e carbonatitos do complexo alcalino de Salitre, GO. *Anais do V Congresso Brasileiro de Geoquímica*, Niterói, Rio de Janeiro, pp.594-597.
- Morbidelli, L., Gomes, C.B., Beccaluva, L., Brotzu, P., Garbarino, C., Riffel, B.F., Ruberti, E., Traversa, G., 1997. Parental magma characterization of Salitre cumulate rocks (Alto Paranaíba Alkaline Province, Brazil) as inferred from mineralogical, petrographic, and geochemical data. *International Geology Review*, 39(8), pp.723-743.
- Oliveira, Í.L., Brod, J.A., Cordeiro, P.F., Dantas, E.L., Mancini, L.H., 2017. Insights into the late-stage differentiation processes of the Catalão I carbonatite complex in Brazil: New Sr–Nd and C–O isotopic data in minerals from niobium ores. *Lithos*, 274, pp. 214-224.

- Oliveira, Í.L., Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Reimold, W.U., Fuck, R.A., 2022. The IUGS nomenclature on kalsilite-bearing volcanic rocks: A critical appraisal and recommendations. *Journal of Petrology*, 63(5), pp. 1-14.
- Palmieri, M., Machado, S.A.M., Nascimento, E.L.C., Assis, L.C., 2008. Avaliação de recursos minerais. Relatório interno Anglo American Brasil.
- Palmieri, M., 2011. Modelo geológico e avaliação de recursos minerais do depósito de nióbio Morro do Padre, Complexo Alcalino-Carbonatítico Catalão II, GO. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 94 pp.
- Palmieri, M., Brod, J.A., Cordeiro, P., Gaspar, J.C., Barbosa, P.A.R., de Assis, L.C., Junqueira-Brod, T.C., Silva, S.E.E., Milanezi, B.P., Machado, S.A., Jácomo, M.H., 2022. The carbonatite-related Morro do Padre niobium deposit, Catalão II Complex, central Brazil. *Economic Geology*, 117(7), pp. 1497-1520.
- Philpotts, A.R., 1967. Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rocks. *Economic Geology*, 62(3), pp. 303-15.
- Prokopyev, I.R., Doroshkevich, A.G., Zhumadilova, D.V., Starikova, A.E., Nugumanova, Y.N., Vladykin, N.V., 2021. Petrogenesis of Zr-Nb (REE) carbonatites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia): Mineralogy and inclusion data. *Ore Geology Reviews*, 131, pp. 104042.
- Pufahl, P.K. & Groat, L.A., 2016. Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: an invited paper. *Economic Geology*, 112(3), pp. 483-516.
- Ramos, G.S., 2021. Caracterização mineralógica do processo de beneficiamento do minério de nióbio da Mina Boa Vista, Catalão-GO. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 116 pp.
- Ribeiro, C.C., Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Gaspar, J.C., Palmieri, M., Cordeiro, P.F.O., Torres, M.G., Grasso, C.B., Barbosa, E.S.R., Barbosa, P.A.R., Ferrari, A.J.D., Gomide, C.S., 2014. Potencial e controles metalogenéticos de ETR, Ti e Nb em províncias alcalino-carbonatíticas brasileiras. In: Silva, M.D.G.D., Rocha Neto, M.B.D., Jost, H., Kuyumjian, R.M., (Eds.), *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*. Belo Horizonte, CPRM, pp. 559-589.
- Rocha, E., Nasraoui, M., Soubiès, F., Bilal, E., Parseval, P., 2001. Évolution géochimique du pyrochlore au cours de l'altération météorique du gisement de Catalão II (Goiás, Brésil). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 332(2), pp. 91-98.
- Rock, N.M.S., 1991. *Lamprophyres*. Glasgow: Blackie, 285 pp.
- Rudashevsky N.S., Kretser Y.L., Rudashevsky V.N., Sukharzhevskaya E.S. 2004. A review and comparison of PGE, noble-metal and sulphide mineralization in phoscorites and carbonatites from Kovdor and Phalaborwa. In: Wall, F. and Zaitsev A.N. (Eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, pp. 375-405.
- Ruiz, F.V., Cordeiro, P., Reich, M., Motta, J.G., Ribeiro, C.C., Angerer, T., Bernardes, R.B., 2022. The genetic link between kamaufugite magmatism and alkaline-carbonatite complexes in the Late Cretaceous Alto Paranaíba Igneous Province, Central Brazil. *International Geology Review*, pp. 1-23.
- Rukhlov, A.S. & Bell, K., 2010. Geochronology of carbonatites from the Canadian and Baltic Shields, and the Canadian Cordillera: clues to mantle evolution. *Mineralogy and Petrology*, 98, pp.11-54.

- Russell, H.D., Hiemstra S.A., Groeneveld D., 1954. The mineralogy and petrology of the carbonatite at Loolekop, Eastern Transvaal. *South African Journal of Geology*, 57(1), 197-208.
- Savko, K.A., Samsonov, A.V., Salnikova, E.B., Stifeeva, M.V., Kuznetsov, A.B., Kotov, A.B., Larionova, Y.O., Korish, E.H., Larionov, A.N., Chervyakovskaya, M.V. and Tsybulyaev, S.V., 2023. Paleoproterozoic alkaline-carbonatite magmatism in the convergent tectonic setting: Evidences from 2.07 Ga Dubravinsky complex in the Eastern Sarmatia. *Precambrian Research*, 395, p.107153.
- Scheibe, L.F., Furtado, S.M.D.A., Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., 2005. Cretaceous alkaline magmatism from Santa Catarina state, southern Brazil. In: Gomes, C.B. (Eds.), *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*. EdUSP, pp. 523-571.
- Silva, A.D., 1986. Jazida de nióbio de Araxá, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C. (Eds.), *Principais depósitos minerais do Brasil*. Brasília, MME/DNPM, 2, pp. 456-462.
- Simonov, V.A., Vasil'ev, Y.R., Stupakov, S.I., Kotlyarov, A.V., Karmanov, N.S., 2016. Petrogenesis of dunites of the Guli ultrabasic massif (northern Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics*, 57(12), 1696-1715.
- Sonoki, I.K. & Gardá G.M., 1988. Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental. *Compilação e adaptação às novas constantes de decaimento*. Boletim Instituto de Geociências Universidade São Paulo, 19, pp. 63-85.
- Srivastava R.K., Heaman L.M., Sinha A.K., Shihua, S., 2005. Emplacement age and isotope geochemistry of Sung Valley alkaline-carbonatite complex, Shillong Plateau, northeastern India: implications for primary carbonate melt and genesis of the associated silicate rocks. *Lithos*, 81(1-4), pp. 33-54.
- Tappe, S., Foley, S.F., Jenner, G.A., Kjarsgaard, B.A., 2005. Integrating ultramafic lamprophyres into the IUGS classification of igneous rocks: rationale and implications. *Journal of Petrology*, 46(9), pp. 1893-1900.
- Tappe, S., Foley, S.F., Jenner, G.A., Heaman, L.M., Kjarsgaard, B.A., Romer, R.L., Stracke, A., Joyce, N., Hoefs, J., 2006. Genesis of ultramafic lamprophyres and carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a consequence of incipient lithospheric thinning beneath the North Atlantic craton. *Journal of Petrology*, 47(7), pp.1261-1315.
- Toledo, M.C.M., Lenharo, S.L., Ferrari, V.C., Fontan, F., De Parseval, P., Leroy, G., 2004. The compositional evolution of apatite in the weathering profile of the Catalão I alkaline-carbonatitic complex, Goiás, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, 42(4), pp.1139-1158.
- Traversa, G., Gomes, C.B., Brotzu, P., Buraglini, N., Morbidelli, L., Principato, M.S., 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, pp.71-98.
- Tröger, W.E., 1928. Alkaligesteine aus der Serra do Salitre im westlichen Minas Geraes, Brasilien. *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abteilung A*, pp. 202-204.
- U.S. Geological Survey, 2022, Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202 p.
- Vartiainen, H., 1980. The petrography, mineralogy and petrochemistry of the Sokli carbonatite massif northern Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin 313*, pp. 126.
- Wall, F. & Zaitsev, A.N. (Eds.), 2004. Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province. *The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland*, London.

- Warr, L.N., 2021. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), pp. 291-320.
- Wolff, J.A., 1994. Physical properties of carbonatite magmas inferred from molten salt data, and application to extraction patterns from carbonatite–silicate magma chambers. *Geological Magazine*, 131(2), pp. 145-153.
- Woolley, A.R. & Kempe D.R.C., 1989. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions and element distribution. In: K. Bell (Eds), *Carbonatite Genesis and Evolution*. Unwin Hyman, London. pp.1-14.
- Woolley, A.R., Bergman, S.C., Edgar, A.D., Le Bas, M.J., Mitchell, R.H., Rock, N.M., Scott Smith, B.H., 1996. Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites, and the kalsilitic, melilitic, and leucitic rocks. *The Canadian Mineralogist*, 34(2), pp.175-186.
- Woolley, A.R., 2001. *Alkaline Rocks and Carbonatites of the World, Part 3. Africa*. The Geological Society, 384 pp.
- Woolley, A.R. & Kjarsgaard, B.A., 2008a. *Carbonatite Occurrences of the World: Map and Database*. Geological Survey of Canada, Open File 5796, 1 CD-ROM + 1 map.
- Woolley, A.R., & Kjarsgaard, B.A., 2008b. Paragenetic types of carbonatites as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database. *The Canadian Mineralogist*, 46(4), 741-752.
- Wu, F.Y., Yang, Y.H., Li, Q.L., Mitchell, R.H., Dawson, J.B., Brandl, G., Yuhara, M., 2011. In situ determination of U–Pb ages and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Phalaborwa carbonatite Complex, South Africa. *Lithos*, 127(1-2), pp. 309-322.
- Wyllie P.J., 1989. Origin of carbonatites: evidence from phase equilibrium studies. In: Bell, K. (Eds.). *Carbonatites: Genesis and Evolution*. Unwin Hyman, London, pp. 500-545.
- Yaxley, G.M., Anenburg, M., Tappe, S., Decree, S., Guzmics, T., 2022. Carbonatites: classification, sources, evolution, and emplacement. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 50, pp. 261-293.
- Yegorov L.S., 1993. Phoscorites of the Maymecha-Kotuy ijolite-carbonatite association. *International Geology Review*, 35(4), 346-358.

THE COQUEIROS PHOSPHATE DEPOSIT, CATALÃO II ALKALINE-CARBONATITE COMPLEX: SIGNIFICANCE OF MAGMATIC MECHANISMS IN THE FORMATION OF APATITE CONCENTRATIONS

3.1 INTRODUCTION

Alkaline-carbonatite complexes represent a unique and diverse group of igneous rocks that have placed a long-term debate regarding their origin and mechanisms underlying their economic potential for multiple metals. Many plutonic carbonatite complexes consist of a diverse range of rocks that comprise not only carbonatites but coeval silicate rocks. Temporal and paragenetic associations include the nephelinite-ijolite, melilitite-melilitolite, phonolite/ trachyte-(foid) syenite, lamprophyre, and other rock series (Woolley and Kjarsgaard, 2008). Such highly variable occurrences also include a large range of potential mineralization from critical metals like light rare earth elements, niobium, zirconium, and tantalum (Mitchell, 2015; Anenburg *et al.*, 2021; Pirajno and Yu, 2022), to copper and phosphate deposits (Palabora Mining Company, 1976; Toledo *et al.*, 2004; Decrée *et al.*, 2020), as well as industrial minerals like baddeleyite, magnetite, baryte, and vermiculite (Petrov, 2004).

Unusual igneous phosphate deposits are mainly associated with apatite-bearing ultramafic rocks in carbonatite complexes. According to the U.S. Geological Survey, 95% of the worldwide phosphate resources are sedimentary and only 5% comes from igneous deposits. Most sedimentary phosphate deposits are composed of biochemical rocks termed phosphorites, which contain greater than 18 wt % P_2O_5 , up to a maximum of 35 wt.% P_2O_5 (Pufahl, 2010). Igneous phosphate deposits have generally lower grade ores ranging from 5 to 15 wt.% P_2O_5 , but their alternative exploration is made possible by the apatite composition with fewer contaminants and CO_2 . More homogeneous igneous apatite favors higher grade concentrates with 31 to 41 wt % P_2O_5 , as compared to 30 wt % P_2O_5 for sedimentary deposits (Pufahl and Groat, 2016).

With the increasing demand for phosphate in the production of fertilizers used in the agriculture sector and simultaneous rising prices in the last few years due to geopolitical instabilities among major phosphate suppliers, the search and comprehension of new fonts of phosphate have been critical to ensure many countries food supply. A context that is especially sensible for Brazil, where the agriculture industry chain is one of the most important economic activities contributing to approximately 25% of the country's GDP according to the Brazilian Confederation of Agriculture and Farmin. Despite much of the internal demand for fertilizers supplied by external producers due to limited significant economic phosphate deposits (Fonseca,

2018; Brazil Government Report, 2021). Notably, a distinctive aspect of Brazil's phosphate production relies mostly on igneous sources, in contrast to the worldwide phosphate production and at the expense of generally associated higher mining costs (Pufahl and Groat, 2016).

The challenge in the exploration of many igneous phosphate deposits lies in their distinct geological characteristics. The apatite concentration can involve various processes, including magmatic, late-magmatic, metasomatic, and/or supergenic alteration (Toledo *et al.*, 2004; Chakhmouradian *et al.*, 2017; Decrée *et al.*, 2020; Fendley *et al.*, 2021). The diverse range of rock types in alkaline-carbonatite complexes and common obliteration of magmatic features by metasomatic and supergenic alteration represents another significant element of difficulty in the compression of the mechanisms upon apatite concentration in such singular deposits.

In this regard, the Coqueiros deposits located in the Catalão II alkaline-carbonatite complex is a unique and unexploited igneous phosphate deposit in Brazil, that comprises a major orthomagmatic apatite mineralization with resources estimated in the order of 408 Mt at a grade of 9.0% P₂O₅ (CMOC, 2022). Despite most regional phosphate igneous deposits explore residual apatite in the weathering profile (Toledo *et al.*, 2004; Ribeiro *et al.*, 2014), supergenic concentration is less pronounced in the Coqueiros deposit with resources in the order of 45 Mt at 11.8% P₂O₅. As a distinctive feature, mostly of Catalão II rocks are well preserved from post-magmatic rework, providing a great opportunity to investigate mechanisms responsible for igneous phosphate mineralization. Therefore, we aim to provide in this work (1) a more comprehensive geological background to support later developing studies in the Coqueiros deposit, (2) to investigate the genetic relationships between the different rock types, and (3) to clarify the magmatic apatite concentration in phosphate deposits related to alkaline igneous rocks.

3.2 GEOLOGICAL SETTING

The Late Cretaceous Alto Paranaíba Igneous Province (APIP) in Central Brazil comprises alkaline-carbonatite complexes, kimberlite, kamafugite, and rare lamproite intrusions (*i.e.* dikes, plugs, pipes, and diatremes), and extensive kamafugitic lavas and pyroclastic deposits (Almeida, 1983; Gibson *et al.*, 1995). The magmatism was emplaced on Neoproterozoic metamorphosed sequences of the Brasília Mobile Belt in a narrow NW-SE-trending between the São Francisco Craton on the northeast and the Paraná Basin on the southwest (**Fig. 3.1**). Geochronological studies have pointed to a multi-stage history of emplacement that lasted around 25 Ma in a range that spans between 70 and ~95 Ma (Sonoki and Garda, 1988; Sgarbi *et al.*, 2004; Guarino *et al.*, 2013; Conceição *et al.*, 2020).

An extensive partial melting event of the lithospheric mantle is considered to be responsible for the wide range of K-rich mafic-ultramafic and carbonatitic rocks in the province (Gibson *et al.*, 1995). Small-scale mantle heterogeneities such as metasomatic components may have strong contributions to the magmas formation (Araújo *et al.*, 2001; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2005; Carlson *et al.*, 2007; Guarino *et al.*, 2013). The Trindade Plume has been pointed as the main heat source for the lithospheric melting beneath the South America platform that would lead a track of igneous activity until the present-day Trindade and Martin Vaz volcanic archipelago (Gibson *et al.*, 1995; Thompson *et al.*, 1998; Sgarbi *et al.*, 2004). Other authors argue against the plume model based on the absence of an asthenospheric-like component demonstrated by geochemical and Sr-Nd-Pb isotope data (Comin-Chiaramonti *et al.*, 2005), and no clear spatial distribution through newer and more precise geochronological techniques (*e.g.* Conceição *et al.*, 2020). Alternative petrogenetic models have suggested that the magmatism was triggered by crustal extension events associated with long-lived mantle upwelling (Riccomini *et al.*, 2005), elevated homologous temperature (Guarino *et al.*, 2013), or due to the formation of repeated thermal convection cells (Ferreira *et al.*, 2022).

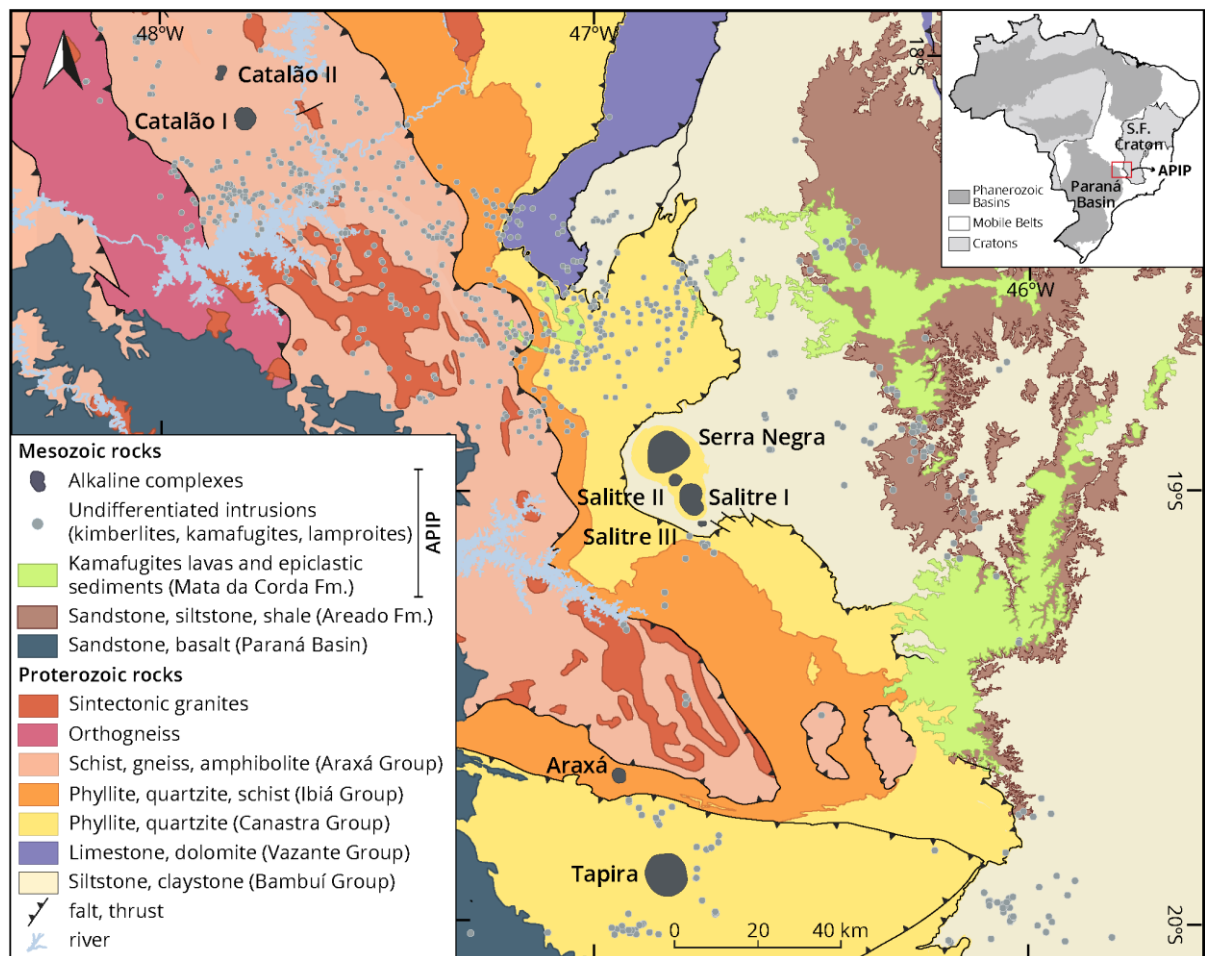


Fig. 3.1 Geological map of the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP) showing the distribution of the main carbonatite complexes, kimberlite, kamafugite and lamproite intrusions, and kamafugitic lavas (Oliveira *et al.*, 2004; Barbosa *et al.*, 2012; Cabral Neto *et al.*, 2017).

The carbonatite-bearing ultramafic complexes are dome-shaped intrusions up to 65 km² in area, that include Tapira, Araxá, Salitre I, II and III, Serra Negra, Catalão I and II. The complexes are dominated by a series of ultramafic cumulus rocks as dunites and bebedourites (*i.e.* alkali clinopyroxenites with major Ca-Ti minerals) usually metasomatized by later pulses of carbonatites and phoscorites (Araújo, 1996; Traversa *et al.*, 2001, Barbosa *et al.*, 2012). Late intrusive stages are mostly alkali feldspar syenites and ultramafic lamprophyres dikes (Morbideilli *et al.*, 1997; Brod, 1999; Guarino *et al.*, 2013). A link between kamafugitic and carbonatitic magmatism is supported by close spatial distribution, petrographic evidence, and a strong geochemical affinity (Brod *et al.*, 2000; Ruiz *et al.*, 2022). The genetic association with carbonatites was also reported in other kamafugite occurrences worldwide, such as Cupaello in Italy (Stoppa and Cundari, 1995), and Toro-Ankole in the East African Rift (Eby *et al.*, 2009; Gurenko and Sobolev, 2018)

A thick lateritic cover was developed in all plutonic intrusions of the province. Fresh rock outcrops are rare and almost restricted to exposures from mining activity. Intense chemical weathering has favored carbonate's dissolution and silicate minerals alteration leading to the formation of a thick pedogenic profile up to 250 m deep (Carvalho, 1974; Conceição *et al.*, 2022). Weathering-resistant country rocks prevented extensive erosion and transportation contributing to the preservation and integrity of the pedogenic cover (Carvalho, 1974). Apatite, pyrochlore, and anatase residual concentration are related to important phosphate, niobium, and titanium resources (Hirano *et al.*, 1990; Ribeiro *et al.*, 2014). Phosphate and niobium are traditionally exploited in the region, with some of the most important niobium world producers (*i.e.* Araxá and Catalão; USGS, 2022). Supergenic concentrations of rare earth elements, vermiculite and baryte are also known, although not yet commercially exploited (Pereira, 1995; Oliveira and Imbernon, 1998; Ribeiro, 2008).

Mineral economic concentrations related to the alkaline-carbonatitic complexes are considered to be formed through a combination of geological factors. For phosphate deposits, apatite-rich rocks such as bebedourites, phoscorites, and carbonatites are crystallized due to magma differentiation by fractional crystallization, liquid immiscibility, and degassing (Barbosa *et al.*, 2012, 2020; Brod *et al.*, 2013; Guarino *et al.*, 2013). Intense lateralization plays an important role in further apatite concentration on the pedogenic cover. Estimated phosphate resources are known from Tapira (1381 Mt at 8.19 wt.% P₂O₅), Araxá (210 Mt at > 10 wt.% P₂O₅), Salitre I (852 Mt at 10.7 wt.% P₂O₅), and Catalão I (966 Mt at 8.5 wt.% P₂O₅; Rodrigues and Lima, 1984; Ribeiro *et al.*, 2014), and Catalão II (453 Mt at 9.3 wt.% P₂O₅; CMOC, 2022).

3.3 THE CATALÃO II COMPLEX

Catalão II is the northernmost alkaline-carbonatite complex of the Alto Paranaíba Igneous Province (18°02'S; 47°52'W) located next to the homonymous city of Catalão (Goiás, Brazil). The complex is an NNE kidney-shaped body that comprises an area of 12 km² dominantly consisting of bebedourites, phoscorites, and carbonatites, with subordinate alkali-feldspar syenite and ultramafic lamprophyre (Machado Júnior, 1991). Existing U-Pb data on perovskite show crystallization ages to be 82 ± 3 and 83 ± 4 Ma for the ultramafic lamprophyre unit (Guarino *et al.*, 2013).

General aspects of Catalão II geology have been described by Machado Júnior (1991), and further improvements were presented by Guarino *et al.* (2016) and Palmieri *et al.* (2022). Separate magmatic systems between the southern and northern portions of the complex are recognized by Machado Júnior (1991) based on differences from the mode of emplacement and predominant rock types (**Fig. 3.2**). Catalão II South is predominantly composed of evolved phoscorites and calcite-to dolomite carbonatites in a complex system of cross-cutting dikes with subordinate small-scale intrusions (*e.g.* stocks and plugs; Palmieri *et al.*, 2022). On the other hand, Catalão II North is composed of successive intrusions of bebedourites, calcite carbonatites, and late intrusive dikes that comprise phoscorites, calcite- to dolomite carbonatites, and alkali-feldspar syenite. Ultramafic lamprophyre is the last magmatic pulse and occurs in all the area as plugs, pipes, and dikes.

Metavolcano-sedimentary country rocks consist of mafic amphibolite, quartz-mica schist, and mica quartzite from the Neoproterozoic Araxá Group (Seer *et al.*, 2001; Klein, 2008). Although the Araxá Group is a lithologically diverse unit, mafic amphibolite is predominant in the complex surroundings. Country rock metasomatic alteration forms a large fenite aureola that ranges over up to 500 m. The resulting fenites are typically K-rich and composed of variable orthoclase, phlogopite, and calcite (Ruiz *et al.*, 2024b).

Geological aspects of the niobium deposits and associated evolved phoscorites and carbonatites are presented by Palmieri *et al.* (2022) and Ruiz *et al.* (2024a). At least two generations of phoscorites and carbonatites were recognized in the southern portion. The phoscorites are apatite-magnetite-tetraferriphlogopite phoscorite and magnetite-apatite phoscorite, both of which are olivine-poor. The carbonatites comprise calcite- and dolomite-varieties. The calcite carbonatite is commonly related to the phoscorites in cyclic horizontal layers, and frequently as pockets in a configuration equivalent to a comb-layering texture described by Cordeiro *et al.* (2010) for Catalão I rocks. Late dolomite carbonatite occurs as transgressive dikes cutting past lithotypes. Both phoscorites and the calcite carbonatite host accessory pyrochlore,

which is related to the orthomagmatic niobium deposits known as Morro do Padre and Boa Vista. Total niobium resources estimated for Catalão II south comprise an order of 14.5 Mt at 1.5 % Nb₂O₅ for Morro do Padre (Palmieri *et al.*, 2022) and 42 Mt at a grade of 1.3 % Nb₂O₅ for Boa Vista (CMOC, 2022).

Guarino *et al.* (2016) describe radiogenic compositions for Catalão II rocks similar to the Alto Paranaíba kimberlites and kamafugites ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.70503\text{--}0.70599$; $\epsilon\text{Nd}_i = -6.8$ to -4.7 ; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28248\text{--}0.28249$; $\epsilon\text{Hf}_i = -10.33$ to -10.8), and compatible with a source from an old lithospheric mantle. Further carbon isotopic data indicates a mantle-derived signature. Extensive accumulation processes are the main mechanism interpreted for the formation of magmatic rocks in the complex.

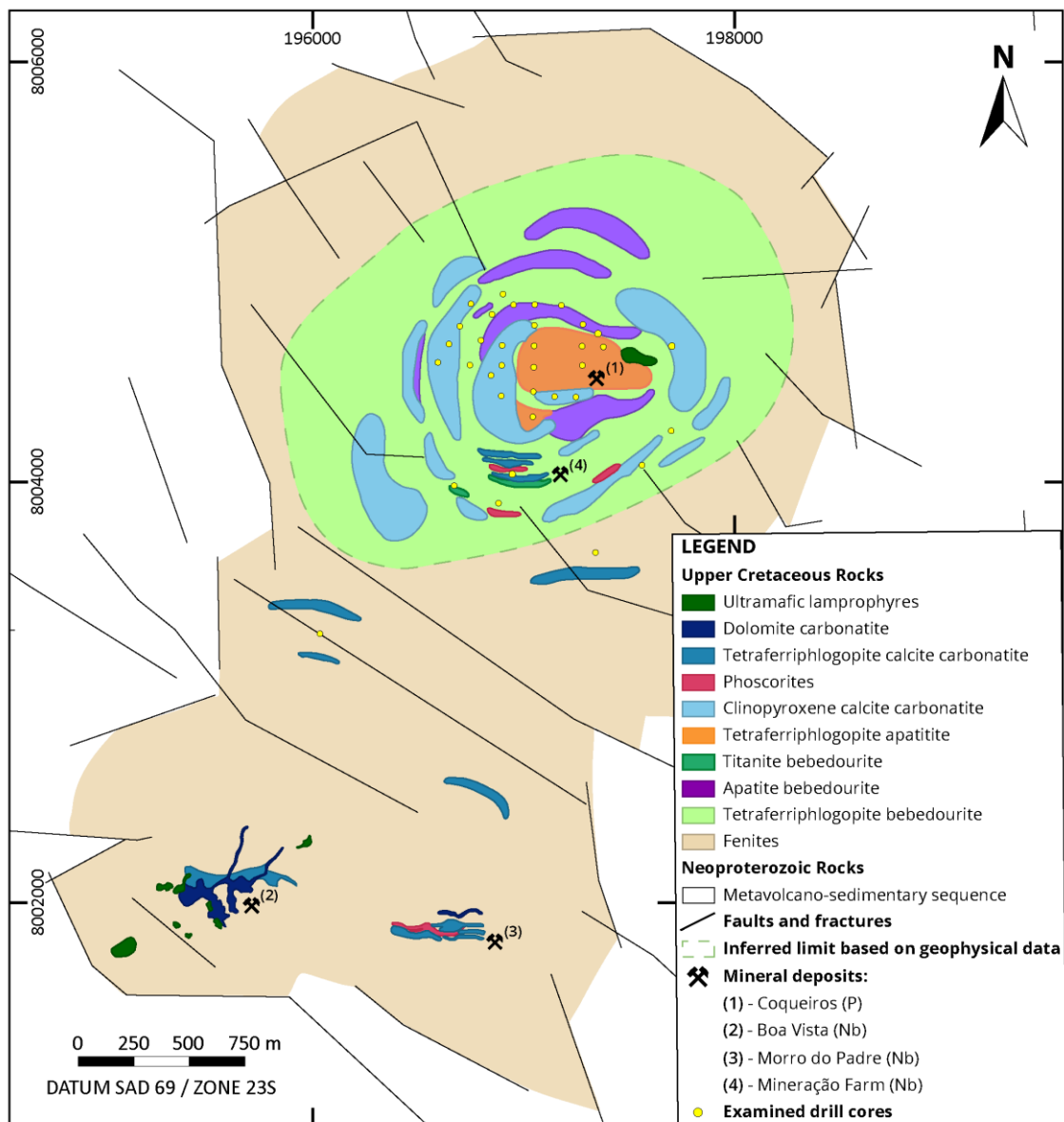


Fig. 3.2 Interpretive geological sketch of the Catalão II complex showing the distribution of main rock types (Palmieri *et al.*, 2022; Ramos, 2021). The location of Coqueiros, Morro do Padre, Boa Vista deposits, and examined drill cores are indicated on the map.

Apatite-rich rocks host important phosphate resources in the northern portion. The area known as the Coqueiros deposit remains unexplored and the detailed lithological characterization was poorly constrained in previous works. Despite the deposit's relevance for the Brazilian domestic demand for phosphate, some modifying factors are still underdeveloped to enable the economic extraction, such as the lack of geological information and metallurgical process, and legal and environmental questions.

3.4 MATERIALS AND ANALYTICAL PROCEDURES

Representative samples have been collected from historical drill cores provided by past exploration campaigns in the area. A total of seventy-five samples of the different lithological facies were selected based on the preservation from weathering and metasomatic alteration. General structure aspects such as cross-cutting relationship, mode, and sequence of emplacement were examined on thirty-four drill cores as illustrated in **Fig. 3.2**.

Composite maps were obtained using a Bruker M4 Tornado energy-dispersive micro-X-ray fluorescence (μ -EDXRF) spectrometer at the Institute of Mineralogy and Petrography, University of Innsbruck (Innsbruck, Austria). The polychromatic beam is focused by a polycapillary lens, resulting in a spot size of 17 μm at 17.48 keV (molybdenum $K\alpha$). Chemical mapping was performed with a Rh tube and two energy-dispersive Si-drift detectors, at 20 mbar vacuum, 50 kV and 600 nA. Map resolution is $50 \times 50 \mu\text{m}$ and dwell time per pixel was 50 ms. Each map is normalized to the minimum and maximum integral intensities. A stochastic fast deconvolution was applied in order to minimize the effect of spectral overlaps in maps (e.g., Ba- $L\alpha$ on Ti- $K\alpha$). The resultant composite maps show the intensities of Ca, Ce, Fe, K, Mg, Nb, Nd, Ni, Sm, Ti with different colors that can be combined in multi-elementary images used to reveal mineral distribution and textures of complex mineralogical systems as illustrated on section 3.6.

Mineral compositions were determined using a JEOL JXA-8230 electron microprobe (EMPA) at the Regional Center for Technological Development and Innovation (CRTI), Federal University of Goiás (Goiânia, Brazil). The microprobe is equipped with five wavelength dispersive spectrometers (WDS). Analyses were performed using an acceleration voltage of 15 kV and a peak counting time of 10 s for major elements and 30 s for minor elements. The beam current was 20 nA with a defocused electron beam of 2 μm diameter for silicates (*i.e.* clinopyroxene, mica, titanite, and amphibole) and oxides (*i.e.* magnetite, ilmenite), 5 nA and 10 μm for carbonates (*i.e.* calcite) and phosphates (*i.e.* apatite).

A total of 537 compositions were obtained for major mineral components on bebedourites, apatite, and carbonatites from Catalão II. A set of natural and synthetic phases were set as internal

analysis standards. For silicates were used jadeite (Na), hornblende (F), olivine (Mg, Ni), enstatite (Si), orthoclase (K), Mn-hornolite (Mn), diopside (Ca), ilmenite (Ti), celsian (Ba), chromite (Cr), Cl-scapolite (Cl), synthetic Al_2O_3 (Al), Fe_3O_4 (Fe), V_2O_3 (V) and ZrSiO_4 (Zr). For oxides, olivine (Mg, Ni), chlorapatite (P), Mn-hornolite (Mn), ilmenite (Ti), diopside (Ca), synthetic SiO_2 (Si), Al_2O_3 (Al), Cr_2O_3 (Cr), Nb, Fe_3O_4 (Fe), V_2O_3 (V), and XGLASS for Zn. For carbonates and phosphates, Sr-anorthite (Sr), jadeite (Na), olivine (Mg), chlorapatite (P), Mn-hornolite (Mn), orthoclase (K), calcite (Ca), Cl-scapolite (Cl), siderite (Fe), and synthetic CaF_2 (F), SiO_2 (Si), Al_2O_3 (Al), LaPO_4 (La), CeO_2 (Ce), BaSO_4 (Ba, S) and NdPO_4 (Nd).

Whole-rock major and trace element compositions were determined for twenty-six samples at ALS Brazil Laboratories following internal analytical reproducibility procedures (ALS, 2022). For major elements (Al_2O_3 , BaO, CaO, Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MgO, MnO, Na_2O , P_2O_5 , SO_3 , SiO_2 , SrO, TiO_2), rock powder sample (0.66 g) was fused with lithium tetraborate – lithium metaborate flux (12:22), which includes lithium nitrate as an oxidizing agent, and analyzed by X-ray fluorescence spectrometry (XRF, ME-XRF26). Total carbon and sulfur were determined using an infrared spectroscopy analyzer (C-IR07, S-IR08) and the loss of ignition (LOI) by weight variation before and after heating in a muffle furnace (OA-GRA05x).

Trace elements (Ba, Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) through an acid digestion of fused beads containing a mixture of nitric, hydrochloric and hydrofluoric acids (ME-MS81). A set of trace elements (As, Bi, Hg, In, Re, Sb, Se, Te, Tl) were obtained by ICP-MS through digestion with aqua regia in a graphite heating block and dilution of the solution with deionized water (ME-MS42), and base metals (Ag, Cd, Co, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Sc, Zn) by atomic emission spectroscopy (ICP-AES) using four acid digestion with perchloric, nitric, hydrofluoric and hydrochloric acids (ME-4ACD81). Contents over the superior detection limit (*e.g.* Sr, Nb, Cu) were reanalyzed by a wavelength dispersive X-Ray fluorescence spectrometer through fusion with a lithium borate flux containing 20% sodium nitrate as an oxidizing agent (ME-XRF15b).

3.5 THE COQUEIROS DEPOSIT

The Coqueiros deposit in the Catalão II northern area is a pipe-like intrusion formed from multiple magma pulses in a concentric zoned structure (**Fig. 3.2**). The sequence of rocks, from the earliest to the youngest, was established by cross-cutting relationships observed in the drill-core descriptions. An outer ultramafic rim presents an elliptical shape ranging around 1.7 x 2.5 m and is made up of a tetraferriphlogopite-rich bebedourite with sparse K-rich fenite xenoliths. Marginal lens-shaped intrusions are composed of apatite bebedourite and diopside calcite carbonatite. The size of the lens is variable, measuring between 200 to 600 m along the major axis and 50 to 150 m along the minor axes. The central core is predominantly composed of a tetraferriphlogopite apatite with an elliptical shape that ranges from 300 to 600 m. Late-stage bebedourites and an associated aegirine-augite calcite carbonatite occur as small-scale stocks and plugs (< 15 m) intrusive in previous units. The discrimination between clinopyroxene-bearing carbonatites was not possible on a feasible scale, and therefore, diopside calcite carbonatite and aegirine-augite calcite carbonatite were both grouped into a single unit on the map.

A series of late intrusive veins and dikes were emplaced towards the northern portion of the complex. Different petrographic stages of phoscorites associated with a clinopyroxene-lacking calcite carbonatite occur with limited distribution as small dikes ranging from 20 to 80 cm. A larger phoscorite-carbonatite intrusion is located in the southwest area of the deposit. The intrusion is composed of a vertical stockwork measuring up to 20 m thick and comprises niobium mineralization known as the Mineração Farm deposit. Small dolomite carbonatite veins (< 10 cm) are overspread and in some portions as small-scale dikes (up to 2 m). Rare alkali-feldspar syenite dikes were described in the central portion (< 1 m). Ultramafic lamprophyres are ubiquitous as veins and dikes ranging from 15 cm up to 2 m. Locally, thicker lamprophyres intrusions can form small plugs up to 100 m thick.

The major apatite-bearing lithologies are the bebedourites and associated calcite carbonatites. Although the phoscorites contain an important apatite content, they are volumetrically limited and do not contribute substantially to the phosphate mineralization. Other lithologies do not contain apatite (*i.e.* dolomite carbonatite) or do contain as a minor accessory phase (*i.e.* alkali-feldspar syenite and ultramafic lamprophyres).

3.6 CLASSIFICATION AND PETROGRAPHY

In this work, we will focus on the description of the most voluminous apatite-bearing lithologies that comprise the phosphate mineralization. The rock classification criteria follow Barbosa *et al.* (2012) recommendations for clinopyroxene-rich cumulate rocks (*i.e.* bebedourites),

and the latest recommendations by Yaxley *et al.* (2022) and Mitchell and Gittins (2022) for carbonatites. In order to make a more straightforward description, we follow a similar approach used by Lapin (1979) for Seblyavr and Krasnova *et al.* (2004b) for the Kovdor Complex. The approach consists of pairing an ultramafic rock with a related carbonatite according to compositional similarities in rock-forming and accessory minerals and due to the presence of gradational contact between the units. On the other hand, different intrusive stages can be recognized based on the parageneses and crosscutting relationships (*i.e.* sharp contacts). Therefore, at least three bebedourite stages can be recognized and two of them can be paired with a respective clinopyroxene-bearing calcite carbonatite (**Tab. 3.1**).

The first bebedourite intrusive stage is the **tetraferriphlogopite bebedourite** which occurs in the outer portion of the Coqueiros deposit. The tetraferriphlogopite bebedourite is intruded by further lithologies and is often affected by metasomatic halos after the transformation of clinopyroxene into late tetraferriphlogopite. The rock is dark green and fine- to medium-grained (**Fig. 3.3A**). Magmatic layering is common as small-scale banding defined by the alternation of clinopyroxene- and tetraferriphlogopite-rich layers. They show adcumulate texture (**Fig. 3.4A**) with cumulus subhedral crystals of clinopyroxene (0.2-3.0 mm; 45-60 vol.%), tetraferriphlogopite (0.2-1.2 mm; 30-40 vol.%; **Fig. 3.4B**), and apatite (0.1-0.8 mm; 8-15 vol.%). Intercumulus crystals include small amounts of anhedral titanite (0.1-1.0 mm; < 2 vol.%) and calcite (< 1.0 mm). Phlogopite may occur in the central portions of larger tetraferriphlogopite crystals. Minor orthoclase xenocrysts are present in some portions derived from the feldspar-rich basement rocks which are common as xenoliths. Rare zirconolite forms fine-grained crystals (< 0.1 mm) with a distinctive dark red colour.

Tab. 3.1 Sequence of bebedourites and early calcite carbonatites of the Catalão II complex.

Intrusive Stage	Rock Type	Essential Minerals	Accessory Minerals	Subsolidus Minerals
III	Aegirine-augite calcite carbonatite	Cal + Cpx + Tfphl	Ap + Ttn ± Zrn ± Wad	Amp
	Titanite bebedourite	Cpx + Ap + Tfphl + Ttn	Cal	Amp ± Py
II	Diopside calcite carbonatite	Cal + Tfphl + Cpx	Mag + Ap + Ttn ± Phl ± Zrn ± Pyh ± Ccp ± Bn	Ilm ± Amp ± Py
	Tetraferriphlogopite apatite	Ap + Tfphl + Mag	Cal + Cpx + Pyh ± Zrn ± Ttn ± Ccp ± Bn	Amp + Tfphl* ± Py
	Apatite bebedourite	Cpx + Ap + Tfphl + Mag	Ttn + Zrn ± Phl ± Cal ± Pyh ± Ccp ± Bn	Amp + Tfphl* + Ilm ± Py
I	Tetraferriphlogopite bebedourite	Cpx + Tfphl + Ap	Ttn ± Phl ± Or ± Cal ± Zrc	Amp + Tfphl*

Abbreviations: Amp – amphibole, Ap – apatite, Bn – bornite, Cal – calcite, Ccp – chalcopyrite, Cpx – clinopyroxene, Ilm – ilmenite, Mag – magnetite, Or – orthoclase, Phl – phlogopite, Py – pyrite, Pyh – pyrrhotite, Tfphl – tetraferriphlogopite, Ttn – titanite, Wad – wadeite, Zrc – zirconolite, and Zrn – zircon (Warr, 2021). * Subsolidus rework minerals.

The second intrusive stage is composed by the apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatitite, and diopside calcite carbonatite. The three petrographic lithotypes are related by gradational contact defined by modal variation in the clinopyroxene, apatite, and calcite contents.

The **apatite bebedourite** is defined by the high apatite content and by the presence of magnetite. They occur as lens- or elliptical-shaped intrusions and sometimes as dikes cutting earlier tetraferriphlogopite bebedourite. The apatite bebedourite is green and medium- to coarse-grained (**Fig. 3.3B**). The lithotype is characterized by clinopyroxene (20-50 vol.%), apatite (15-40 vol.%), tetraferriphlogopite (10-30 vol.%), and the presence of magnetite (5-15 vol.%; **Fig. 3.4C**). The texture is adcumulate to locally mesocumulate containing cumulus subhedral clinopyroxene (0.5-3.0 mm), apatite (0.2-2.5 mm), and tetraferriphlogopite (0.2-5.0 mm; **Fig. 3.4D**). Magnetite is intercumulus as anhedral poikilitic crystals (0.5-6.0 mm) with inclusions of all other major minerals. Titanite (0.2-2.0 mm; up to 10 vol.%) and minor calcite (< 2 vol.%) may occur as intercumulus material. Phlogopite may also occur in the central portions of larger tetraferriphlogopite crystals.

The **tetraferriphlogopite apatitite** appears light green and dark brown due to the contrast between the apatite and mica (**Fig. 3.3C**). The rock is medium- to coarse-grained and dominated by apatite (40-60 vol.%), tetraferriphlogopite (20-40 vol.%), magnetite (5-20 vol.%), and calcite (up to 15 vol.%; **Fig. 3.4E**), with accessory clinopyroxene (2-8 vol.%). The texture is mesocumulate in more calcite-rich samples (**Fig. 3.4F**). Apatite (0.1-1.0 mm) and tetraferriphlogopite (0.2-4.0 mm) occur as cumulus subhedral crystals. Magnetite (0.5-8.0 mm) and calcite (< 1.0 mm) are intercumulus. Rare titanite forms subhedral crystals.

A **diopside calcite carbonatite** occurs in gradational contact with the apatite bebedourite and tetraferriphlogopite apatitite. The carbonatite is a white to greenish rock with variable granulation (**Fig. 3.3D**). Magmatic layering is frequent and defined by the accumulation of silicate-rich layers (*e.g.* tetraferriphlogopite and clinopyroxene). The carbonatite is dominated by calcite (55-80 vol.%) and variable proportions of tetraferriphlogopite (10-30 vol.%), diopside clinopyroxene (up to 20 vol.%), apatite (5-10 vol.%), magnetite (1-5 vol.%), and titanite (< 1-8 vol.%). Medium to coarser-grained varieties consist of a granular mosaic of anhedral to subhedral calcite (up to 3.0 cm), subhedral tetraferriphlogopite (0.2-1.0 mm), clinopyroxene (0.2-2.0 mm), and minor intergranular apatite (0.1-0.8 mm) and magnetite (0.1-2.0 mm; **Fig. 3.5A**). Fine-grained portions exhibit an inequigranular texture that consists of coarse tetraferriphlogopite crystals (up to 5.0 mm) set in a matrix composed of calcite (0.1-1.0 mm), small tetraferriphlogopite crystals (0.1-1.0 mm), clinopyroxene (0.1-0.8 mm), apatite (0.1-1.2 mm), and intergranular magnetite (0.1-

0.8 mm; **Fig. 3.5B**). Locally, subhedral titanite crystals can achieve high modal proportions (up to 8 vol.%).

A set of accessory minerals is common to the second-stage rocks (*i.e.* apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and diopside calcite carbonatite). Zircon are subhedral fine-grained crystals (0.2-1.0 mm). Intergranular sulfides are represented by pyrrhotite (0.2-1.5 mm), chalcopyrite (< 0.5 mm), and bornite (< 0.2 mm). Ilmenite occurs as exsolution lamellae in magnetite and occasionally as independent subhedral crystals (0.1-0.5 mm) in apatite bebedourite and diopside calcite carbonatite.

The last bebedourite stage is formed by a **titanite bebedourite**. The unit is defined by a high titanite content, the presence of black tetraferriphlogopite, and the absence of magnetite (**Fig. 3.3E**). They occur mainly as stocks and plugs intrusive in previous units. The rock is dark green medium to coarse-grained and composed of clinopyroxene (40-60 vol.%), apatite (20-30 vol.%), tetraferriphlogopite (10-20 vol.%), and variable proportions of titanite (2-10 vol.%). Locally, some samples can achieve peculiar high titanite contents up to 60 vol.%. The texture is adcumulate to mesocumulate (**Fig. 3.5C**). Subhedral clinopyroxene (0.5-5.0 mm), tetraferriphlogopite (0.5-4.5 mm), and euhedral titanite (0.2-3.0 mm) are cumulus phases (**Fig. 3.5D**). Subhedral apatite (0,1-1,5 mm) and anhedral calcite (up to 5 vol.%) are intercumulus.

The **aegirine-augite calcite carbonatite** occurs in association with the titanite bebedourite. This carbonatite unit differs from the first one by the absence of magnetite and a more aegirine clinopyroxene composition (see section 3.8.1 for more details). The rock is white, medium- to coarse-grained, and dominated by calcite (60-80 vol.%), clinopyroxene (5-20 vol.%), and tetraferriphlogopite (10-15 vol.%; **Fig. 3.3F**). They show a granular texture (**Fig. 3.5E**) composed of subhedral to anhedral calcite (0.4-2.5 mm), subhedral clinopyroxene (0.2-2.0 mm), and tetraferriphlogopite (0.2-1.8 mm; **Fig. 3.5F**). Accessory minerals are apatite (2-5 vol.%), titanite (<1-2 vol.%), and zircon (< 1 vol.%). Rare wadeite occurs as intergranular fine-grained crystals (0.2-0.5 mm).

Minerals derived from subsolidus reworking processes are common for all units and can be distinguished based on textural criteria (Traversa, *et al.*, 2001; Reguir *et al.*, 2012). Light-blue fibrous aggregates of amphibole occur in the borders of clinopyroxene crystals. Ilmenite exsolution lamellae in magnetite crystals occur in apatite bebedourite and diopside calcite carbonatite. Minute reddish flakes of tetraferriphlogopite replace larger tetraferriphlogopite and clinopyroxene crystals in tetraferriphlogopite- and apatite bebedourites, and tetraferriphlogopite

apatite. Small veins (< 0.5 mm) of pyrite cut the original texture in most of the rock types, sometimes forming pyrite overgrowth around pyrrhotite and chalcocopyrite crystals.

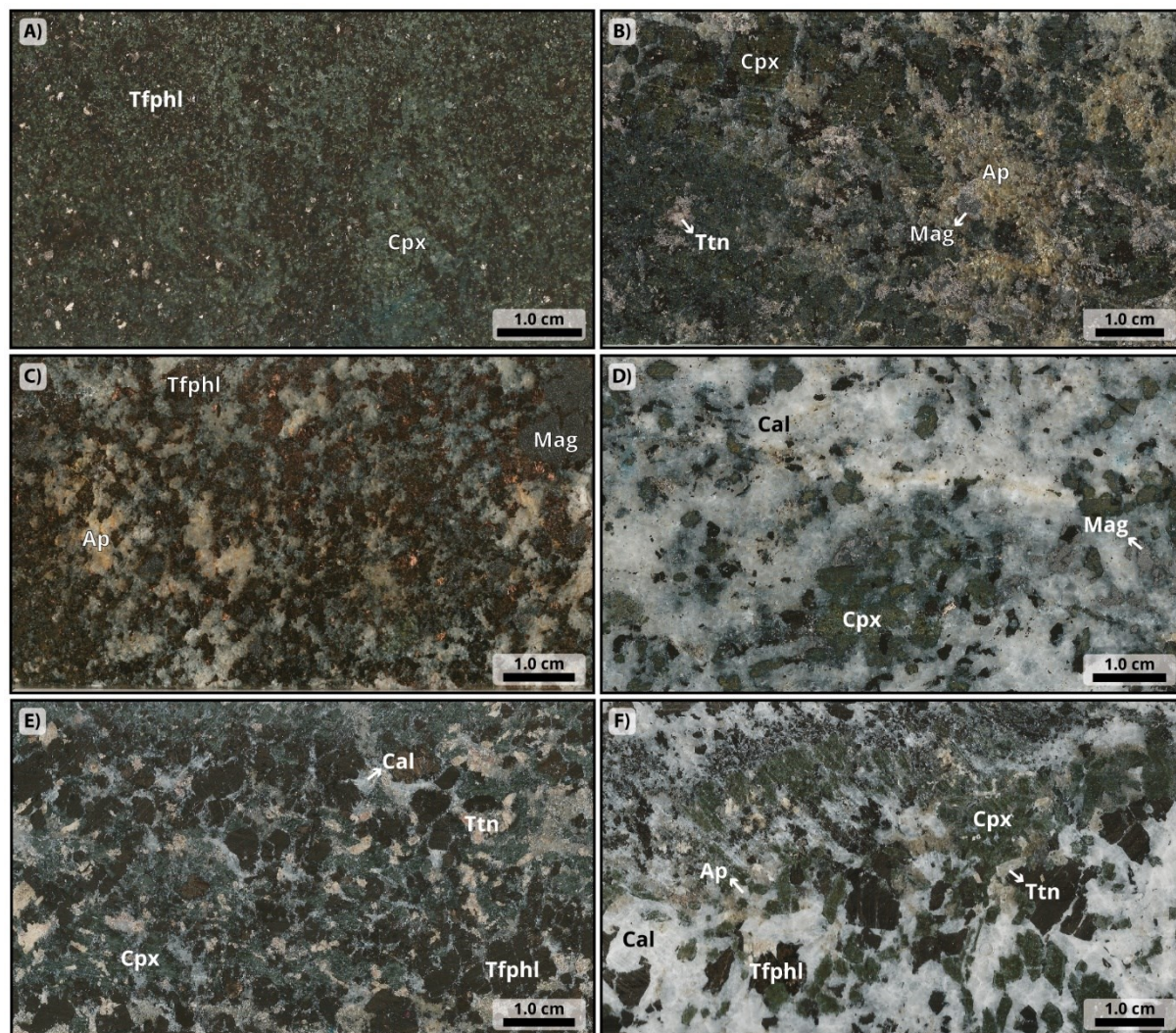


Fig. 3.3 Drill-core samples of bebedourites and associated carbonatites from the Catalão II complex. **A)** Fine-grained **tetraferriphlogopite bebedourite** containing similar modal proportions of clinopyroxene and tetraferriphlogopite. **B)** **Apatite bebedourite** with intergranular apatite between coarser grains of clinopyroxene and tetraferriphlogopite. Titanite and magnetite are accessories. **C)** **Tetraferriphlogopite apatite** with accessory magnetite. **D)** **Diopside calcite carbonatite** containing disseminated crystals of clinopyroxene, tetraferriphlogopite, and magnetite. **E)** **Titanite bebedourite** composed of coarse clinopyroxene, tetraferriphlogopite, and titanite, with intergranular calcite and apatite. **F)** Coarse-grained **aegirine-augite calcite carbonatite** containing subhedral crystals of calcite, clinopyroxene, and titanite, with small intergranular concentrations of apatite. **Abbreviations:** Ap – apatite, Cal – calcite, Cpx – clinopyroxene, Mag – magnetite, Tfphl – tetraferriphlogopite, and Ttn – titanite.

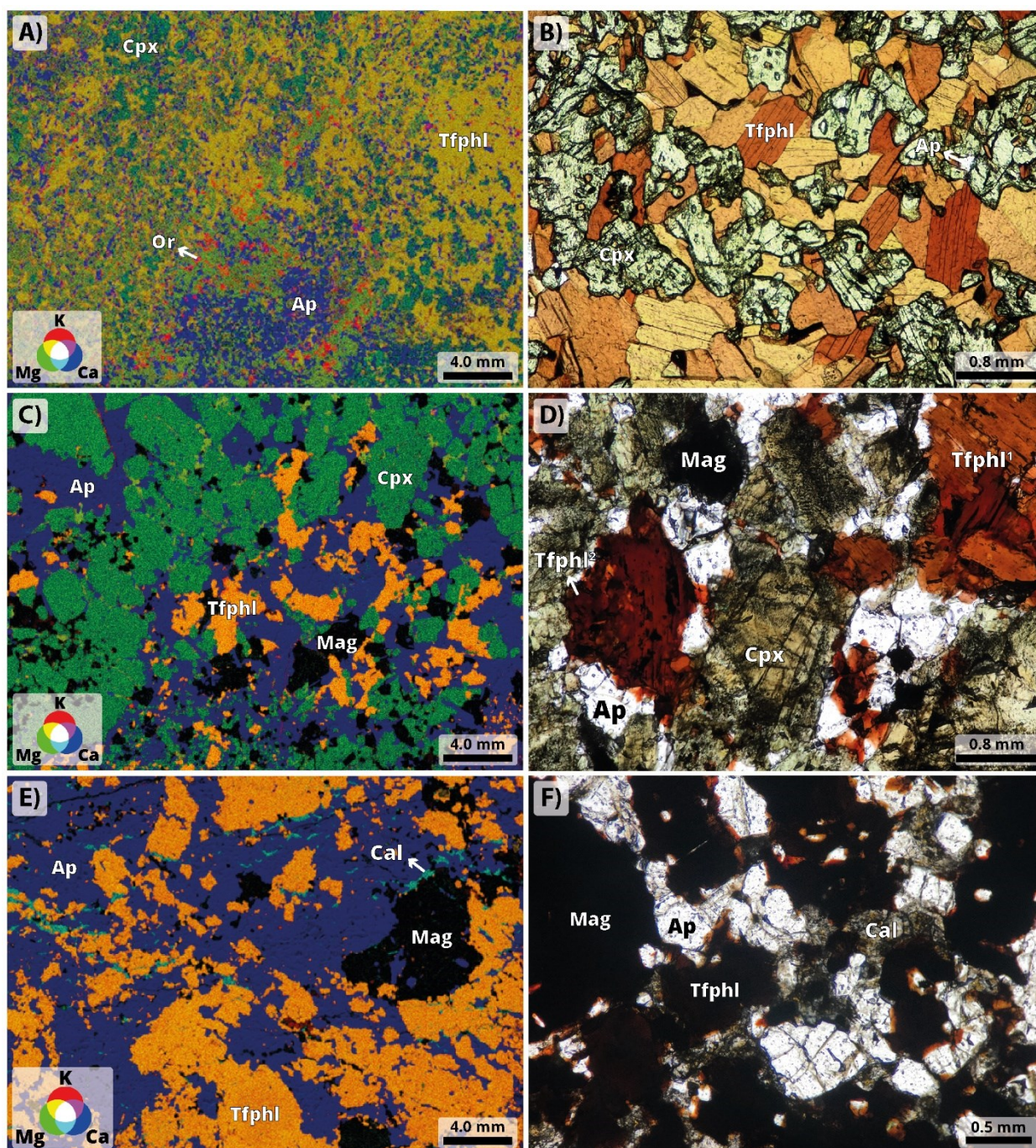


Fig. 3.4 Petrographic features from the Catalão II complex. **Tetraferriphlogopite bebedourite:** **A)** Composite map (μ -EDXRF) showing adcumulate texture composed of cumulus clinopyroxene, tetraferriphlogopite, apatite, locally with minor orthoclase xenocrysts; **B)** Typical light green clinopyroxene crystals and reddish orange tetraferriphlogopite with typical reverse pleochroism. **Apatite bebedourite:** **C)** Composite map (μ -EDXRF) with adcumulate to mesocumulate texture composed of cumulus clinopyroxene, tetraferriphlogopite, apatite, and intercumulus magnetite; **D)** Detail showing coarse tetraferriphlogopite lamellas (Tfphl¹) replaced in the borders by small tetraferriphlogopite flakes (Tfphl²). **Tetraferriphlogopite apatitite:** **E)** Composite map (μ -EDXRF) illustrating large tetraferriphlogopite and magnetite, with an intergranular mosaic of apatite; **F)** Intercumulus calcite and minor magnetite, between apatite and tetraferriphlogopite crystals. **Abbreviations:** Ap – apatite, Cal – calcite, Cpx – clinopyroxene, Mag – magnetite, Tfphl – tetraferriphlogopite, and Ttn – titanite.

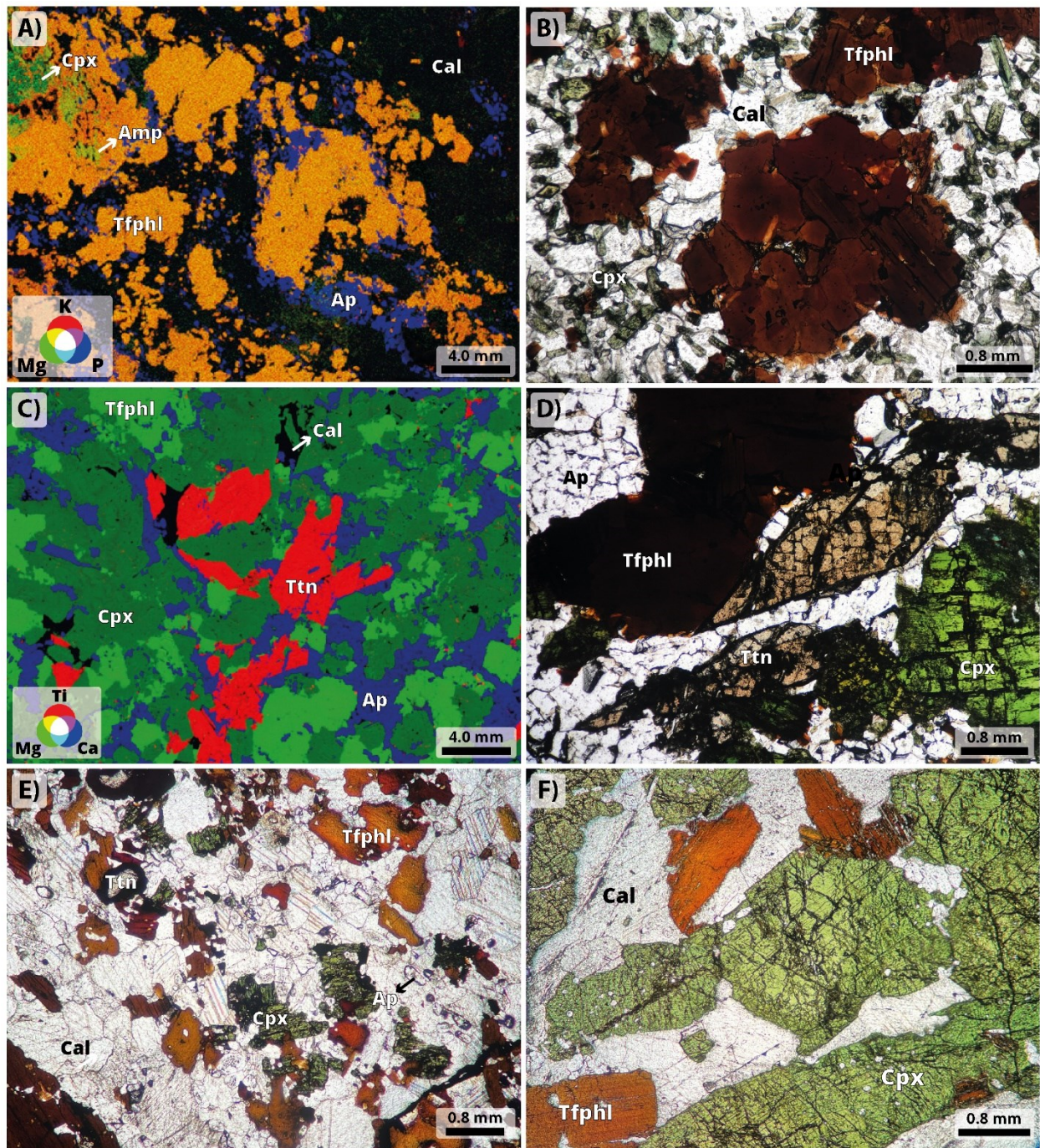


Fig. 3.5 Petrographic features from the Catalão II complex. **Diopside calcite carbonatite** **A)** Composite map (μ -EDXRF) showing a granular texture composed of calcite, tetraferriphlogopite and minor apatite. Accessory clinopyroxene crystals showing late substitution to amphibole in the borders; **B)** Fine-grained sample with large tetraferriphlogopite macrocrysts and an equigranular matrix composed of calcite and clinopyroxene. **Titanite bebedourite:** **C)** Composite map (μ -EDXRF) illustrating an adcumulate texture composed of clinopyroxene, tetraferriphlogopite, apatite, titanite, and minor intercumulus calcite; **D)** Euhedral titanite crystals, typical dark tetraferriphlogopite, and deep green clinopyroxene. **Aegirine-augite calcite carbonatite:** **E)** Granular texture composed of calcite, tetraferriphlogopite, clinopyroxene, and minor titanite; **F)** Coarse-grained sample showing zoned clinopyroxene crystals. **Abbreviations:** Amp – amphibole, Ap – apatite, Cal – calcite, Cpx – clinopyroxene, Mag – magnetite, Tfphl – tetraferriphlogopite, and Ttn – titanite.

3.7 MINERAL COMPOSITION

3.7.1 APATITE

Apatite is an essential constituent in Catalão II bebedourites and apatitite, and an accessory mineral in the carbonatites. For all the examined rocks, apatite is fluorapatite with F contents greater than 0.58 *a.p.f.u.* ($n = 67$). Cl contents are usually below the detection limit or very low (≤ 0.03 wt.%) and OH is estimated based on stoichiometry to complete the monovalent anionic site ($F+Cl+OH=1$). The average compositions are shown in **Tab. 3.2** from representative EPMA analyses. SrO contents range from 0.20 to 1.17 wt.%, and $LREE_2O_3$ ($La_2O_3+Ce_2O_3+Nd_2O_3$) from 0.25 to 1.18 wt.%. SiO_2 and Na_2O contents are low to moderate, varying from below the detection limit up to 0.37 and 0.30 wt.%, respectively. Low concentrations are present from BaO (≤ 0.20 wt.%), FeO (≤ 0.15 wt.%), MnO (≤ 0.14 wt.%), and MgO (≤ 0.11 wt.%).

Slight composition variation between the units can be recognized based on Sr, LREE, and Si ranges (**Fig. 3.6A**). Apatite in the tetraferriphlogopite bebedourite is relatively homogeneous and presents a generally higher SrO (0.37-1.11 wt.%), moderate $LREE_2O_3$ (0.54-0.95 wt.%) and SiO_2 (≤ 0.32 wt.%). Apatite from other units has a continuous enrichment trend between paired rocks from poor Sr, LREE, and Si crystals to more evolved compositions. Apatite bebedourite shows a low to moderate SrO (0.28-0.66 wt.%), $LREE_2O_3$ (0.40 to 0.83 wt.%), and SiO_2 (≤ 0.23 wt.%). Tetraferriphlogopite apatitite presents slightly more enrichment of SrO (0.25-1.17 wt.%) and $LREE_2O_3$ (0.24-1.0 wt.%), and low SiO_2 (≤ 0.14 wt.%). Diopside calcite carbonatite closely overlaps the tetraferriphlogopite apatitite composition field in terms of SrO (0.40-0.90 wt.%) and $LREE_2O_3$ (0.44-0.97 wt.%), although with moderate SiO_2 (≤ 0.33 wt.%). Titanite bebedourite shows low to moderate SrO (0.20-0.83 wt.%), $LREE_2O_3$ (0.30-0.80 wt.%), and SiO_2 (≤ 0.20 wt.%). Aegirine-augite calcite carbonatite is characteristically more evolved with higher SrO (0.40-0.70 wt.%), $LREE_2O_3$ (0.65-1.18 wt.%), and SiO_2 (0.20-0.45 wt.%).

The apatite chemical variation on a magmatic system is considered to depend on a series of factors such as the apatite-melt partitioning coefficients, melt composition, and charge-balance constraints for multi-element substitutions. In that sense, Sr and REE enrichment in apatite is a common feature reported for carbonatite and associated rocks (Toledo and Pereira, 2001; Chakhmouradian *et al.*, 2017). Despite partitioning coefficients of apatite in carbonatitic affinity melts having lower values for those elements according to experimental works (Klemme and Dalpé, 2003; Hammouda *et al.*, 2010), the melt composition enriched in Sr and REE is considered to play a major role in the apatite chemical variation (Wang *et al.*, 2014).

Tab. 3.2 Representative apatite analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on a total of eight cations in the A and X sites. OH was calculated assuming (F+Cl+OH)=1 in the Z site. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.

Rock Type	Tfphl bebedorite	Ap bebedourite	Tfphl apatite	Di-Cal carbonatite	Ttn bebedourite	AegAug-Cal carbobatite
Sample	CQ97-71.6	CQ-04	CQ-49	CQ-59	CQ-51	CTH4-184.9
SiO ₂	0.18	0.11	0.06	0.31	0.19	0.33
FeO	0.02	0.01	0.03	0.04	-	0.04
MnO	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	-
MgO	0.02	-	0.11	-	-	0.00
CaO	52.63	56.27	54.74	56.02	56.01	53.49
SrO	0.78	0.62	0.25	0.77	0.83	0.56
Na ₂ O	0.24	0.13	0.14	0.17	0.25	0.18
BaO	0.08	-	0.01	-	-	0.05
La ₂ O ₃	0.17	0.21	0.07	0.27	0.21	0.26
Ce ₂ O ₃	0.34	0.48	0.13	0.44	0.51	0.49
Nd ₂ O ₃	0.11	0.14	0.04	0.07	0.06	0.19
P ₂ O ₅	41.65	41.56	41.59	40.95	41.22	40.00
F	4.46	2.46	3.74	2.48	2.18	4.43
Cl	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
-O = (F,Cl) ₂	1.88	1.04	1.58	1.05	0.92	1.87
Total	98.83	100.96	99.36	100.52	100.65	98.20
Structural formulae calculated on the basis of 8 cations						
P	3.031	2.916	2.976	2.885	2.894	2.926
Si	0.016	0.009	0.005	0.026	0.016	0.028
T Site	3.046	2.925	2.981	2.911	2.910	2.954
Ca	4.846	4.997	4.958	4.995	4.977	4.951
Ba	0.003	-	0.000	-	-	0.002
Sr	0.039	0.030	0.012	0.037	0.040	0.028
Fe	0.002	0.001	0.002	0.003	-	0.003
Mn	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	-
Mg	0.003	-	0.013	-	-	0.000
Na	0.020	0.011	0.012	0.014	0.020	0.015
La	0.004	0.004	0.001	0.006	0.004	0.005
Ce	0.007	0.010	0.003	0.009	0.010	0.010
Nd	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001	0.004
M Site	4.927	5.055	5.006	5.066	5.065	5.018
F	1.212	0.646	1.000	0.653	0.572	1.211
Cl	0.002	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000
OH*	-	0.354	-	0.346	0.428	-

The REE incorporation is usually coupled with Si and Na in the apatite crystal structure. The following substitution mechanisms are pointed by the britholite-type reaction $\text{Ca}^{2+} + \text{P}^{5+} = \text{Si}^{4+} + \text{REE}^{3+}$ (Pasero *et al.*, 2010) and, alternatively, by the belovite-type reaction $2\text{Ca}^{2+} = \text{Na}^{+} + \text{REE}^{3+}$ (e.g. Brassinnes *et al.*, 2005). Overall maximum contents for substituent cations in the apatite composition are estimated up to 2.7 wt.% for SrO, 4.5 wt.% for LREE₂O₃, 4.2 wt.% for SiO₂, 0.8 wt.% for Na₂O (Chakhmouradian *et al.*, 2017).

Apatite information from other Alto Paranaíba alkaline complexes is limited to Catalão I, Salitre I, and Tapira (**Fig. 3.6B**). Apatite from Catalão I phoscorites and dolomite carbonatite shows a wide compositional range (Cordeiro *et al.*, 2010). P1 phoscorite has lower Sr contents and greater variation in REE and Si. Whereas, apatite evolution in P2, P3, and dolomite carbonatite is controlled by the Sr enrichment achieving very high grades in some samples (up to 5.36 wt.%).

Apatite from Salitre I bebedourites and phoscorites tends to present little compositional variation with a slight increase of Sr, Na, and REE (Barbosa *et al.*, 2020). Composition trends shown for these rocks point towards the enrichment in Si and REE as the most relevant feature in Salitre I apatite. Apatite in Tapira dunite and bebedourites presents limited content in Sr, Si, and Na, and significantly high REE ranges (Brigatti *et al.*, 2004). To explain the high REE (up to 0.66 wt.%) accompanied by low Si content (≤ 0.20 wt.%), therefore not compatible with the britholite-type substitution, Brigatti *et al.* (2004) suggest a different coupled substitution mechanisms by the deprotonation of the OH site ($\text{Ca}^{2+} + \text{OH}^- \rightarrow \text{REE}^{3+} + \text{O}^{2-}$).

As pointed out by published apatite data from the Alta Paranaíba complexes, early-stage apatite presents general low compositional variations and tends to evolve to slightly more REE and Si-rich ranges according to the britholite-substitution or other more complex substitution mechanisms (*e.g.* Catalão I P1; Salitre I phoscorites and bebedourites; Tapira dunite and bebedourites). A similar compositional range to the observed in apatite from Catalão II rocks. Regardless of the more homogeneous apatite composition in the tetraferriphlogopite bebedourite, the following rocks present a REE+Si enrichment with a moderate Sr contribution. Whereas, late-stage apatites seem to accomplish a much wider Sr range indicating an important role in the Ca^{2+} - Sr^{2+} substitution (*e.g.* Catalão I P2, P3, and dolomite carbonatite). Na composition is categorically low ranging near or under the detection limits for most analyses.

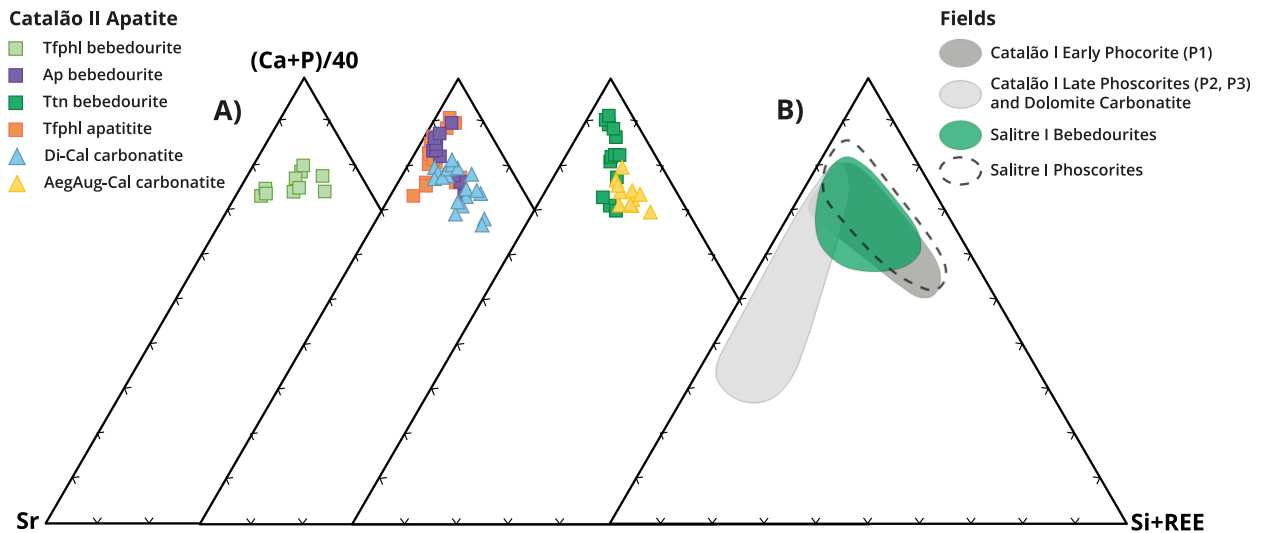


Fig. 3.6 A) Compositional variation of Catalão II apatite expressed in terms of Sr, Ca+P, and Si+REE (*a.p.f.u.*). **B)** Apatite compositional fields from Catalão I (Cordeiro *et al.*, 2010), and Salitre I (Barbosa *et al.*, 2012, 2020).

3.7.2 CLINOPYROXENE

Clinopyroxene is an essential constituent in bebedourites and is also present in calcite carbonatites. Diopside is the dominant pyroxene, although normal-zoned crystals may occur with aegirine-augite borders in tetraferriphlogopite bebedourite, titanite bebedourite, and calcite carbonatites. Clinopyroxene compositions show a broad range in Mg# ($\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$) between 20.8 and 79.8 ($n = 118$), and an overall Fe- and Na-enrichment, which displays a gradual increase of the hedenbergite and aegirine components towards the rim and through the different lithotypes (**Tab. 3.3**). Typically, crystals with diopside composition are light green in thin section (**Fig. 3.4B-D**), whereas those with a higher aegirine component presents a darker deep green colour (**Fig. 3.5D**). Zoned crystals display clear colour differences between light diopside cores and dark aegirine-augite rims (**Fig. 3.4F**).

Some compositional differences can be pointed out for clinopyroxene in the bebedourites and calcite carbonatites (**Fig. 3.7**). Tetraferriphlogopite bebedourite presents a large range for Mg# (35.8-69.2) and Na_2O_3 (0.79-5.00 wt.%) displaying between diopside and aegirine-augite compositional fields. TiO_2 is low (≤ 0.40 wt. %) and MnO is relatively high (0.16-0.70 wt. %).

Apatite bebedourite shows a more limited range for Mg# (53.8-79.2) only as diopside. Na_2O_3 is lower (0.27-1.56 wt. %) compared with other lithologies, TiO_2 can achieve higher grades up to 1.13 wt. % in some crystal cores, and MnO is low (0.09-0.27 wt. %). Diopside calcite carbonatite presents a quite similar composition with apatite bebedourite by Mg# range (48.0-79.8), comparable TiO_2 (up to 1.39 wt. %) and MnO (0.13-0.23 wt.%), but are richer in Na_2O_3 (0.24-3.26 wt. %) with locally aegirine-augite rim.

The later titanite bebedourite has an average low Mg# (30.8-62.3) and moderate to high contents of Na_2O_3 (1.62-4.68 wt.%) that place between diopside and aegirine-augite. TiO_2 can locally approach up to 1.08 wt.%, and MnO contents are moderate (0.14-0.43 wt.%). Whereas the aegirine-augite calcite carbonatite has a conspicuously lower Mg# (20.8-36.5) with a distinctive Na_2O_3 enrichment (2.01-7.44 wt.%) reaching a maximum of 58.1 mol.% for the aegirine molecule. Clinopyroxene composition places predominantly as aegirine-augite with a few diopside cores. TiO_2 is low (≤ 0.54 wt. %) and MnO is higher (up to 0.71 wt.%).

Most diopsides contain some amount of tetrahedral deficiency (*i.e.* $\text{Si} + {}^{\text{IV}}\text{Al} < 2$) due to a very low Al_2O_3 content (bellow than 0.50 wt.%). The tetrahedral deficiency is a common feature reported for Alto Paranaíba bebedourites (Brod, 1999; Barbosa *et al.*, 2012) and kamafugites (Sgarbi *et al.*, 2000; Melluso *et al.*, 2008). Following the procedure recommended by Morimoto (1988), the presence of Fe^{3+} is required to complete the tetrahedral site (up to 0.09 *a.p.f.u.*) for all

diopsides analyses. Aegirine-augite compositions also present low Al₂O₃ (≤ 0.23 wt.%), however, with a distinctive lower deficiency (≤ 0.04 *p.f.u* Fe³⁺). Cr₂O₃ concentrations are very low for all rock types and are usually below 0.02 wt %.

Tab. 3.3 Representative clinopyroxene analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on a total of six atoms of oxygen. Fe₂O₃* was calculated assuming stoichiometry. Mg# = MgO/(MgO+FeO+Fe₂O₃)*100. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.

Rock Type	Tfphl bebedorite		Ap bebedourite		Di-Cal carbonatite		Ttn bebedourite		AegAug-Cal carbobaitite	
Sample	CQ-02	CTII4-444.6	CQ-04	CQ-08	CQ97-139.2	CQ-58	CQ-75	CQ-51	CTII4-413.1	CTII4-184.9
SiO ₂	53.35	52.40	52.31	53.16	53.81	52.85	52.44	53.16	52.55	51.95
TiO ₂	0.07	-	1.10	0.25	0.35	0.25	0.23	0.03	0.30	0.42
Al ₂ O ₃	0.05	0.09	0.19	-	0.02	0.11	0.16	0.06	0.06	0.06
Cr ₂ O ₃	-	0.04	0.00	0.01	-	-	-	0.00	-	-
FeO	3.07	11.27	4.45	6.18	4.82	5.99	7.56	5.83	5.05	1.66
Fe ₂ O ₃ *	4.68	2.39	3.20	4.32	1.00	4.23	7.81	9.61	12.36	18.43
MnO	0.16	0.44	0.16	0.27	0.28	0.23	0.28	0.28	0.24	0.16
NiO	0.02	0.00	0.00	0.03	-	-	-	0.02	-	0.04
MgO	14.40	10.72	13.97	12.26	14.92	12.48	9.04	9.43	8.05	7.18
CaO	23.36	19.09	24.83	22.95	23.79	23.38	18.45	17.92	16.37	13.67
Na ₂ O	1.08	3.50	0.48	1.30	0.54	1.07	3.30	3.81	4.84	6.54
Total	100.25	99.95	100.69	100.73	99.51	100.61	99.28	100.17	99.82	100.11

Structural formulae calculated on the basis of 6 atoms of oxygen										
Si	1.971	1.966	1.938	1.979	1.995	1.970	2.000	2.001	1.992	1.964
Al	0.002	0.004	0.008	-	0.001	0.005	0.000	-	0.003	0.002
Fe ³⁺	0.027	0.030	0.054	0.021	0.004	0.025	-	-	0.005	0.033
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.001	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	-	0.007	0.003	-	-
Ti	0.002	-	0.031	0.007	0.010	0.007	0.007	0.001	0.009	0.012
Cr	-	0.001	0.000	0.000	-	-	-	0.000	-	-
Fe ³⁺	0.103	0.288	0.035	0.101	0.024	0.094	0.224	0.272	0.347	0.491
Mg	0.793	0.599	0.771	0.681	0.825	0.693	0.514	0.529	0.455	0.405
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001	-	-	-	0.001	-	0.001
Fe ²⁺	0.095	0.075	0.138	0.193	0.149	0.187	0.241	0.184	0.160	0.053
Mn	0.005	0.014	0.005	0.008	0.009	0.007	0.009	0.009	0.008	0.005
Ca	0.925	0.767	0.986	0.915	0.945	0.934	0.754	0.723	0.665	0.554
Na	0.077	0.255	0.034	0.094	0.039	0.077	0.244	0.278	0.356	0.479
ΣM	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.999	2.000	1.998	1.999	2.000
Ae	8.0	27.0	3.6	9.6	3.8	8.0	24.2	33.4	36.4	50.9
Di	81.7	63.5	81.3	69.8	80.7	71.9	51.0	43.7	46.5	43.0
Hd	10.3	9.4	15.0	20.6	15.5	20.1	24.8	22.9	17.1	6.1
Mg#	65.0	44.0	64.6	53.8	72.0	55.0	37.0	30.8	31.6	26.3

Despite some different major-element composition, clinopyroxene crystals from bebedourites and carbonatite show an evolutionary trend involving a Na and Fe enrichment from pure diopside through intermediate aegirine-augite with moderate hedenbergite member (**Fig. 3.7A**). A similar trend was also reported for other Alta Paranaíba occurrences (**Fig. 3.7B**). Mata da Corda pyroxene presents a narrow range with nearly pure diopside composition, which overlaps early Catalão II diopside cores. Clinopyroxene from Tapira and Salitre I bebedourites are in the

same range as those observed for Catalão II, although Catalão II shows a greater enrichment of the aegirine content (*e.g.* titanite bebedourite).

The clinopyroxene evolution through more hedenbergite-rich members is generally indicated as a product of magmatic evolution, but the aegirine enrichment is somewhat discussed in the literature. Araújo (1996) pointed out that metasomatic overprint would be responsible for the formation of aegirine-augite as a subsolidus replacement from primary diopside in Catalão I, and further studies on Catalão II rocks also have favoured this compositional variation as a result of post-magmatic processes rather than magmatic evolution (Melo, 1999; Guarino *et al.*, 2016). However, extensive data on clinopyroxene compositions have shown that Na and Fe enrichment is a common magmatic feature in carbonatite and associated alkaline silicate rocks (Requir *et al.*, 2012 and references therein) that is also a clear tendency for Catalão II (this work), Tapira (Brod, 1999) and Salitre I complexes (Barbosa *et al.*, 2012).

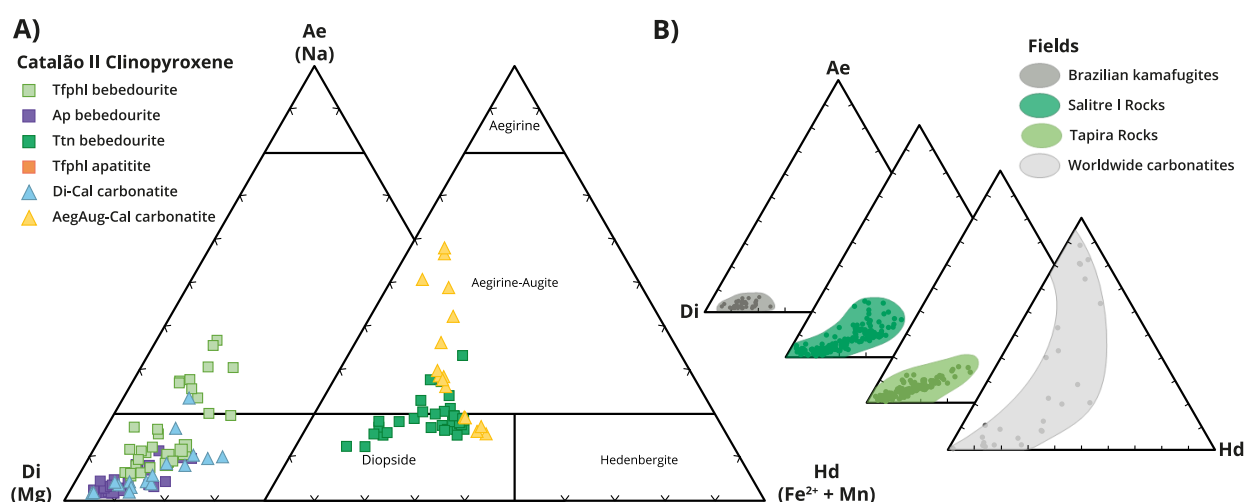


Fig. 3.7 A) Compositional variation of Catalão II clinopyroxenes expressed in terms of diopside (Di), hedenbergite (Hd) and aegirine (Aeg) end-members molecules estimated based on the Mg, Fe²⁺ + Mn and Na contents, respectively. **B)** Clinopyroxene compositional trends from Mata da Corda kamafugites (Sgarbi *et al.*, 2000), Salitre I bebedourites (Barbosa *et al.*, 2012), Tapira bebedourites (Brod, 1999) and worldwide carbonatites (Requir *et al.*, 2012).

3.7.3 MICA

Mica is a ubiquitous mineral component for all petrographic types. Phlogopite–tetraferriannite and –tetraferriphlogopite are the main solid solutions series. Structural formulae were recalculated on the basis of 22 oxygen and part of the Fe was recast as $^{(IV)}\text{Fe}^{3+}$ following the equation $^{(IV)}\text{Fe}^{3+} = 8 - \text{Si} - ^{(IV)}\text{Al}$, according to procedures described by Araújo (1996).

Extensive solid solutions are observed between different end members for trioctahedral micas in carbonatites and associated silicate rocks (Tischendorf *et al.*, 2004; Reguir *et al.*, 2009; **Tab. 3.4**). The phlogopite-annite series is defined by the substitution of Mg^{2+} for Fe^{2+} in the octahedral site (*e.g.* Barbosa *et al.*, 2012). While in the tetraferriphlogopite and tetraferriannite series, Fe^{3+} can substitute Al^{3+} in order to complete the tetrahedral position (*e.g.* Brod *et al.*, 2001; Krasnova *et al.*, 2004b). Other solid solutions are described between phlogopite and eastonite (Lee *et al.*, 2003) and/or kinoshitalite (*e.g.* Gaspar and Wyllie, 1987; Braunger *et al.*, 2018; Giebel *et al.*, 2019). The former is marked by Al in excess which results in the presence of octahedral Al, and the latter by more Ba-enriched compositions accommodated in substitution with K in the interlayer site.

Tab. 3.4 Ideal end-member compositions for trioctahedral micas in accordance with the International Mineralogical Association (IMA) nomenclature.

Endmember	Ideal Chemical Formula
Phlogopite	$\text{K}_2\text{Mg}_6(\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20})(\text{OH})_4$
Annite	$\text{K}_2\text{Fe}^{2+}_6(\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20})(\text{OH})_4$
Eastonite	$\text{K}_2\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{20})(\text{OH})_4$
Siderophyllite	$\text{K}_2\text{Fe}^{2+}_4\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{20})(\text{OH})_4$
Tetraferriphlogopite	$\text{K}_2\text{Mg}_6(\text{Si}_6\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_{20})(\text{OH})_4$
Tetraferriannite	$\text{K}_2\text{Fe}^{2+}_6(\text{Si}_6\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_{20})(\text{OH})_4$
Kinoshitalite	$\text{Ba}_2\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{20})(\text{OH})_4$

A significant feature of Catalão II is the tetrahedral vacancy ($^{(IV)}\text{Si} + ^{(IV)}\text{Al} < 4 \text{ a.p.f.u.}$) that occur at a certain extent in all analysed micas ($n = 140$). As a result, the $^{(IV)}\text{Fe}^{3+}$ substitution is directly related to a characteristic reverse pleochroism ($\alpha > \beta = \gamma$) which is a diagnostic property of tetraferriphlogopite. In cases where complete solid-solutions occur from phlogopite toward tetraferriphlogopite the point of pleochroism inversion is marked by a sharp change in the $^{(IV)}\text{Si}/^{(IV)}\text{Al}$ ratio. This transition was demonstrated for Catalão I rocks by Araújo (1996) and Brod *et al.* (2001), where was detected that phlogopite (*i.e.* with normal pleochroism) can host some tetrahedral deficiency until the turning point estimated at $^{(IV)}\text{Al}$ around 1.5 *a.p.f.u.* A very similar correlation was also identified for Catalão II mica (**Fig. 3.8**), although our data point that the 1.5 *a.p.f.u.* limit is not exact and some superposition may occur with reversal pleochroism observed until 1.65 *a.p.f.u.*

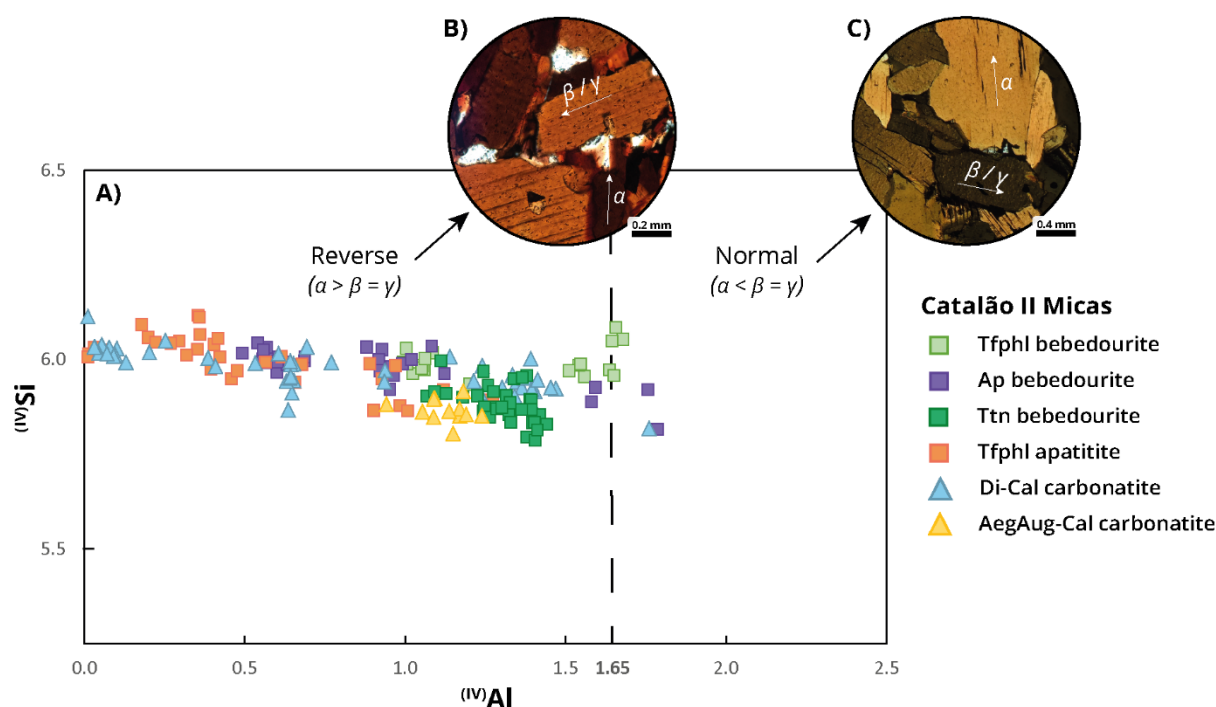


Fig. 3.8 A) $(IV)Al$ and $(IV)Si$ (*a.p.f.u.*) variation for Catalão II showing the change between reverse pleochroism and normal mica. B) Photomicrograph in plan-polarized light illustrating characteristic reverse pleochroism tetraferriphlogopite and C) normal pleochroism phlogopite.

Compositional analyses are plotted in the Mg-Al-Fe system (**Fig. 3.9**). Most of the micas present a generally low Al content and an increase in the Fe/Mg ratio ranging between phlogopite towards other end-members (**Tab. 3**). Based on such compositional differences and aligned with optical and textural properties, two main trends can be depicted for Catalão II micas, phlogopite to tetraferriannite and phlogopite to tetraferriphlogopite.

The **phlogopite-tetraferriannite series** is the main mica trend presented by bebedourites and associated clinopyroxene-bearing calcite carbonatites. The compositional variation shows a progressive decrease of Al and Mg coupled with an increase in Fe^{2+} and Fe^{3+} contents, which leads to a continuous evolution from phlogopite cores (Al_2O_3 9.4-10.3 wt.%; MgO 17.4-20.9 wt.%; Fe_T 12.9-16.1 wt.%) towards tetraferriphlogopite (Al_2O_3 0.1-9.3 wt.%; MgO 10.9-21.5 wt.%) with an important Fe_T content (up to 35.8 wt.%). Phlogopite cores with normal pleochroism occur locally and tetraferriphlogopite is the predominant mica which has a characteristic reddish orange to reddish brown colour (**Fig. 3.10A**). TiO_2 zoning is also observed through more enriched cores (up to 3.2 wt.%) than outer rims (0.4-2.4 wt.%).

Tetraferriphlogopite bebedourite presents a more restricted compositional range ($Mg\#$ 61.1-75.7). They show high MgO (16.4-21.5 wt.%), moderate Al_2O_3 (5.5-9.7 wt.%), relatively low FeO (8.4-13.4 wt.%) and Fe_2O_3 (2.3-8.9 wt.%), and variable TiO_2 content (0.3-2.3 wt.%).

Apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatitite, and diopside calcite carbonatite forms a continuous trend from phlogopite-cores towards Fe-rich tetraferriphlogopite (Mg# 38.5-77.3). Apatite bebedourite has moderate MgO (16.2-20.9 wt.%), a wider range for Al₂O₃ (4.7-10.3 wt.%), little larger contents for FeO (9.4-15.2 wt.%), and Fe₂O₃ (2.9-9.7 wt.%). Tetraferriphlogopite apatitite presents a decrease in the contents of MgO (12.2-18.6 wt.%) and Al₂O₃ (0.1-7.0 wt.%), and enrichment in FeO (10.7-19.7 wt.%) and Fe₂O₃ (7.2-15.7 wt.%). Diopside calcite carbonatite has a much wider composition range which overlaps both previous units. MgO is low to moderate (11.9-18.8 wt.%), Al₂O₃ varies from below the detection limit up to 9.9 wt.%, FeO is relatively high (10.7-20.1 wt.%), and Fe₂O₃ content is variable from 3.6 to 16.2 wt% in more Fe-enriched crystals. TiO₂ is similar for all the following units and varies from around 2.6 wt.% in the core to 0.2-0.5 wt.% in the rims.

Micas from titanite bebedourite and aegirine-augite calcite carbonatite despite following a similar Mg/Fe evolutionary trend coupled with Al depletion, differ by a characteristic depletion in MgO (Mg# 41.2-52.5). Titanite bebedourite presents low MgO (11.8-14.1 wt.%), moderate Al₂O₃ (5.6-7.9 wt.%), a strong increase in FeO (15.8-19.3 wt.%), and moderate Fe₂O₃ (6.0-7.5 wt.%). Aegirine-augite calcite carbonatite has even lower MgO (11.0-11.8 wt.%), virtually constant Al₂O₃ (4.8-6.5 wt.%), high FeO (18.7-20.3 wt.%), and moderate Fe₂O₃ (7.3-9.5 wt.%). TiO₂ content is high for both units (1.6-3.2 wt. %) and may be associated with its darker colour marked by a reddish brown to dark brown pleochroism (**Fig. 3.10B**).

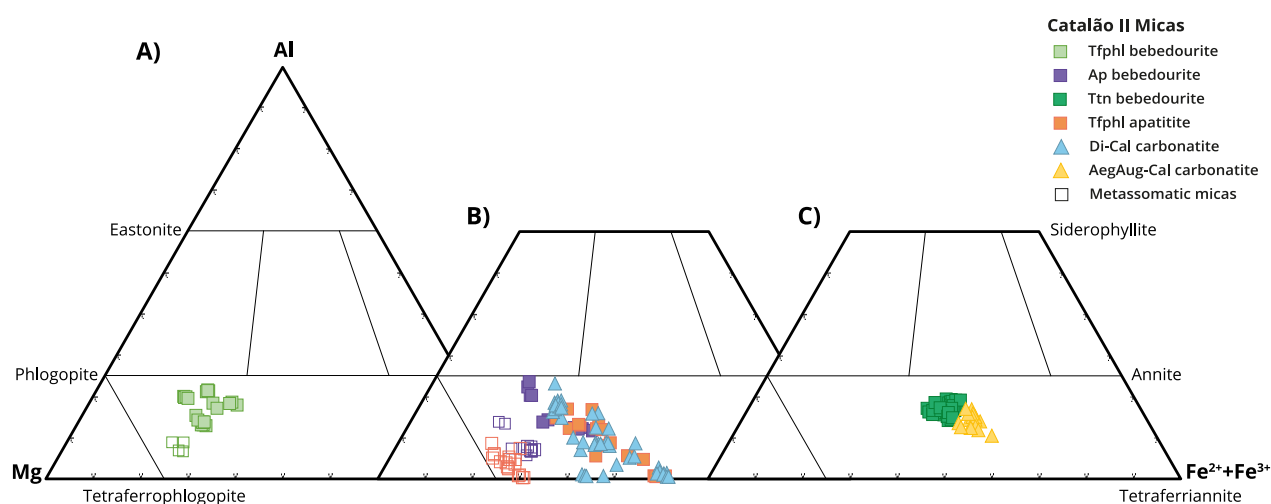


Fig. 3.9 Compositional variation of Catalão II micas in terms of Mg, Al, Fe²⁺, and Fe³⁺ (*a.p.f.u.*).

Tab. 3.5 Representative mica analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on a total of 22 oxygens. Fe₂O₃* was calculated based on ^(IV)Fe³⁺ = 8 – Si – ^(IV)Al, according to procedures described by Araújo (1996). H₂O* was calculated assuming stoichiometry. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.

Rock Type Sample	Tfphl bebedorite CQ-02	Ap bebedourite CQ-04	Tfphl apatitite CQ-54	Di-Cal carbonatite CQ-63	Ttn bebedourite CQ-75	AegAug-Cal carbohatite CTII4-184.9
SiO ₂	39.94	40.47	38.04	37.24	37.39	36.27
TiO ₂	0.74	1.13	0.76	1.14	3.03	2.29
Al ₂ O ₃	6.00	9.23	3.27	2.12	7.62	6.25
Fe ₂ O ₃ *	8.58	4.32	11.62	13.35	6.46	7.84
FeO	8.83	10.44	15.10	17.38	18.41	19.93
MnO	0.13	0.14	0.26	0.22	0.36	0.42
MgO	20.93	20.91	15.69	13.77	12.08	11.51
CaO	-	-	0.02	-	-	0.06
Na ₂ O	0.05	0.05	0.08	0.07	0.05	0.03
K ₂ O	11.41	9.93	11.23	10.95	11.13	9.59
BaO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.13
H ₂ O*	4.01	4.09	3.79	3.73	3.84	3.58
F	-	-	-	-	-	0.27
Cl	-	-	0.01	-	-	0.03
-O=F ₂	-	-	-	-	-	0.12
-O=Cl ₂	-	-	-	-	-	0.01
Total	100.63	100.77	99.88	100.01	100.52	98.18
Structural formulae calculated on the basis of 22 O (OH, F, Cl)						
^(IV) Si	5.975	5.929	6.009	5.983	5.838	5.858
^(IV) Al	1.057	1.594	0.609	0.401	1.402	1.189
^(IV) Fe ₃₊	0.966	0.477	1.382	1.615	0.759	0.953
ΣT	7.999	8.000	7.999	7.999	8.000	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-
^(VI) Ti	0.084	0.125	0.090	0.137	0.356	0.278
^(VI) Fe ²⁺	1.105	1.279	1.994	2.335	2.405	2.692
^(VI) Mn	0.017	0.017	0.034	0.031	0.048	0.057
^(VI) Mg	4.667	4.567	3.696	3.297	2.812	2.771
ΣO	5.873	5.994	5.817	5.804	5.634	5.812
Ba	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002	0.008
Ca	-	-	0.003	-	-	0.010
Na	0.015	0.014	0.024	0.021	0.014	0.010
K	2.178	1.856	2.262	2.245	2.218	1.977
ΣA	2.193	1.870	2.289	2.267	2.235	2.004
OH	4.000	4.000	3.998	4.000	4.000	3.852
F	-	-	-	-	-	0.140
Cl	-	-	0.002	-	0.000	0.008

On the other hand, **phlogopite-tetraferriphlogopite series** is well-marked by small aggregates bordering or in complete replacement of course tetraferriphlogopite plates (**Fig. 3.10C**), and followed by fine amphibole aggregates in replacement of clinopyroxene crystals (**Fig. 3.10D**). Unlike other micas, they characteristically present a lither pleochroism colour ranging from reddish-orange to light orange. The trend is characterized only by tetraferriphlogopite mica with a strong Al₂O₃ depletion that culminates in virtually Al-free plates, and a subsequent Fe₂O₃ increase (up to 17.4 wt.%). MgO contents are high and near constant (22.0-26.2 wt.%) in comparison with low FeO (0.9-6.7 wt.%) and point to little Mg-Fe²⁺ substitution. TiO₂ is significantly lower (0.03-0.6 wt.%) compared with other observed trends and shows no clear zonation.

Different compositional trends were described for other Alto Paranaíba alkaline complexes (Fig. 3.11). The ^(IV)Al deficiency that results in the formation of tetraferriphlogopite is considered to be induced by factors such as elevated peralkalinity (Mitchell, 1995) combined with high oxygen fugacity (Brigatti *et al.*, 1996). Conditions are fairly common in carbonatites and are reported for many other alkaline occurrences in Brazil (Morbiddelli *et al.*, 1995). However, tetraferriphlogopites in Alto Paranaíba ultramafic rocks (*i.e.* dunites, wehrlites, bebedourites, and phlogopitites) were considered to be formed by interaction with residual carbonatitic liquids rather than magmatic origin (Brod *et al.*, 2001). For Tapira and Salitre I bebedourites, phlogopite is the main mica type (Brod, 1999; Barbosa *et al.*, 2012). The mica composition for such bebedourites is reported to spread along the phlogopite-annite join as a direct result of a $Mg^{2+} \leftrightarrow Fe^{2+}$ substitution. In that sense, tetraferriphlogopite occurrence would be more restricted to phlogopite grains border in the proximity of carbonatitic veins or in cases where extensive alteration by late fluids takes place forming metasomatic phlogopitites such as in Araxá and Catalão I complexes (Issa Filho *et al.* 1984; Araújo, 1996).

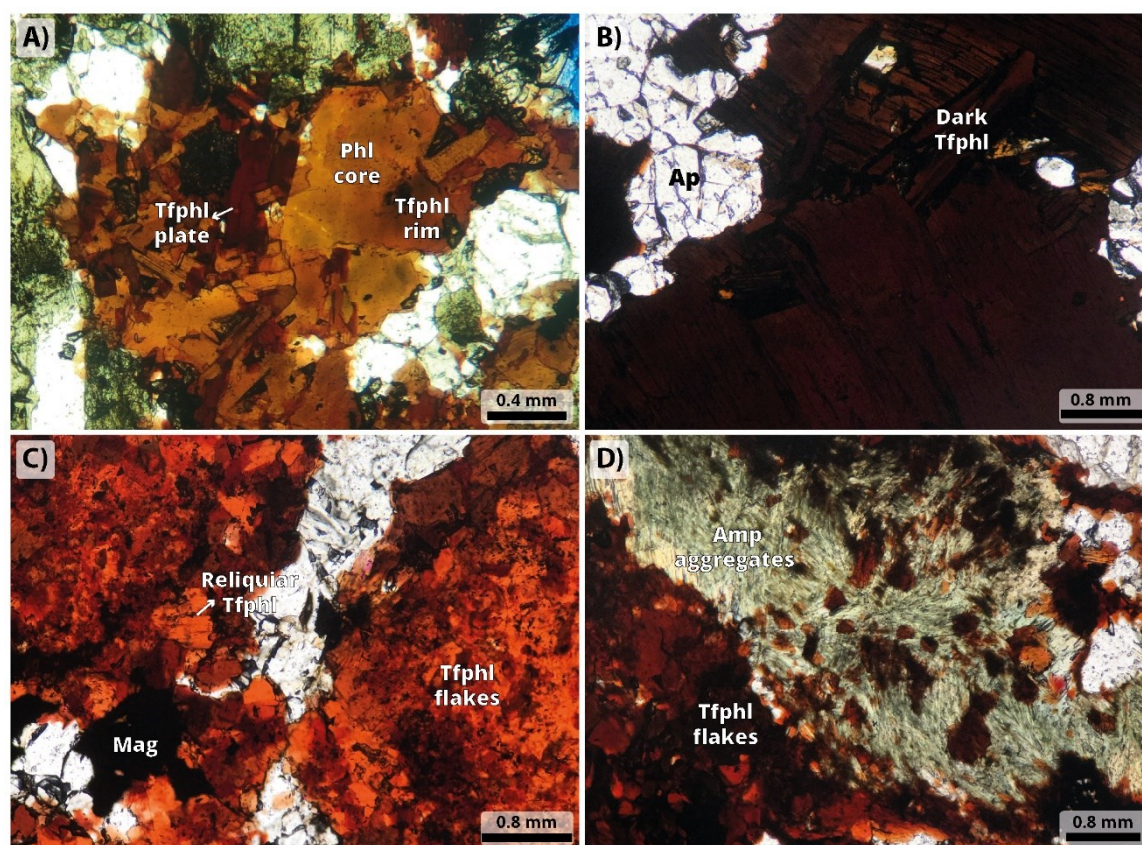


Fig. 3.10 Petrographic features from Catalão II micas. **A)** Phlogopite core with tetraferriphlogopite rim in apatite bebedourite. **B)** Typical dark tetraferriphlogopite in titanite bebedourite. **C)** Coarse tetraferriphlogopite pseudomorph replaced by fine tetraferriphlogopite flakes. **D)** Clinopyroxene pseudomorph replaced by fine amphibole aggregates and tetraferriphlogopite flakes. Abbreviations: Amp – amphibole, Ap – apatite, Mag – magnetite, Phl – phlogopite, and Tfphl – tetraferriphlogopite.

In contrast with bebedourites and ultramafic cumulate rocks from the other Alto Paranaíba complexes, tetraferriphlogopite is the predominant mica in Catalão II bebedourites. Most tetraferriphlogopite has a great Fe_T component that evolves in the direction of the tetraferriannite end-member through a substitution scheme possibly represented by $(\text{VI})\text{Mg} + (\text{IV})\text{Al} \leftrightarrow (\text{VI})\text{Fe}^{2+} + (\text{IV})\text{Fe}^{3+}$. Intermediate micas with similar composition were only described in APiP for Tapira ultramafic dikes and some calcite carbonatites (Brod *et al.*, 2001). To a lesser extent, also occurs tetraferriphlogopite with a composition closer to the stoichiometric end-member characterized by high MgO and low Al_2O_3 , FeO, and TiO_2 contents. This group of mica is typically associated with disequilibrium textures growing in the borders of later grains and is frequently attributed to post-magmatic re-equilibration with late fluids in bebedourites (Morbiddelli *et al.*, 1997; Brod *et al.*, 2001).

Carbonatite micas from Tapira present a much wider variation. Brod *et al.* (2001) argue that some of the carbonatite mica shows evidence of resorption by the magma with rims and irregular patches of tetraferriphlogopite that suggests they are xenocrysts from the ultramafic silicate rocks, and large, euhedral crystals showing oscillatory zoning would be from a magmatic origin. While carbonatite micas from Catalão I and Salitre I closely overlie their respective phoscorite compositional fields. Therefore, in most cases, they are represented by tetraferriphlogopite with a typical Al^{3+} depletion trend.

The Catalão II tetraferriphlogopite in clinopyroxene-bearing carbonatites differs greatly from Catalão I and Salitre I carbonatites and resembles part of the Tapira units. No textural evidence of disequilibrium is observed, which suggests a close association for some units. The Catalão II diopside calcite carbonatite follows the same compositional variation range as apatite bebedourite and tetraferriphlogopite apatite, and aegirine-augite calcite carbonatite follows the titanite bebedourite range.

Compositional trends towards more Al-enriched members (*e.g.* eastonite and siderophyllite) are virtually non-existent for Catalão II rocks. This feature is in sharp contrast with other alkaline occurrences such as Jacupiranga and Palabora complexes, where mica in carbonatites can achieve an important kinoshitalite contribution (Gaspar and Wyllie, 1987; Giebel *et al.*, 2019). Besides the general low-Al for Catalão II micas, BaO content is also very low or close to the detection limits for all analyses (maxima of 0.08 wt.%).

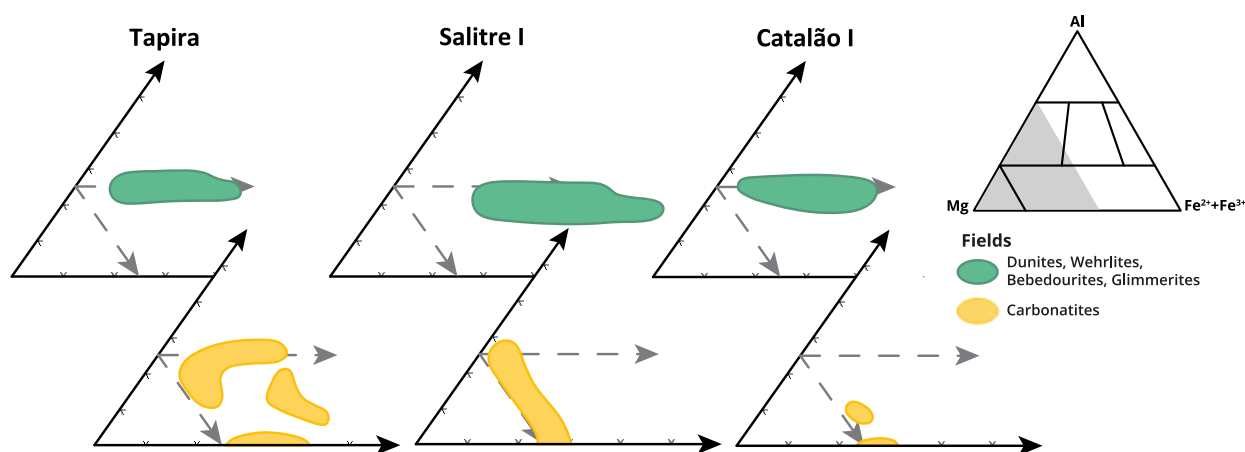


Fig. 3.11 Compositional trends for APiP alkaline complexes: Tapira (Brod, 1999; Brod *et al.*, 2001), Salitre I (Barbosa *et al.*, 2012, 2020), and Catalão I (Araújo, 1996; Brod *et al.*, 2001; Cordeiro *et al.*, 2010).

3.7.4 CARBONATES

Calcite is the only carbonate mineral. It is accessory in bebedourites and apatitite, and a major constituent for the carbonatites. Calcite analyses ($n = 42$) show a fairly homogeneous composition for all units (**Tab. 3.6**). MgO contents range from below the detection limit up to 0.4 wt.%. FeO and MnO proportions are also very low ranging from below the detection limit up to 0.3 wt.% for each oxide. BaO is low (≤ 0.6 wt.%) but can locally achieve a maximum of 0.9 wt.%. The main calcite compositional feature concerns the SrO distribution which shows a 1:2 correlation between Ca and Sr contents (**Fig. 3.12**). Early bebedourites (*i.e.* tetraferriphlogopite bebedourite and apatite bebedourite) present lower SrO contents (0.2-0.6 wt.%). Tetraferriphlogopite apatitite has a wide variation for SrO from below the detection limit up to 1.1 wt.%. Whereas diopside calcite carbonatite is consistently more SrO-enriched (0.5-1.7), likewise titanite bebedourite (0.4-1.6 wt.%) and aegirine-augite calcite carbonatite (1.1-1.3 wt.%).

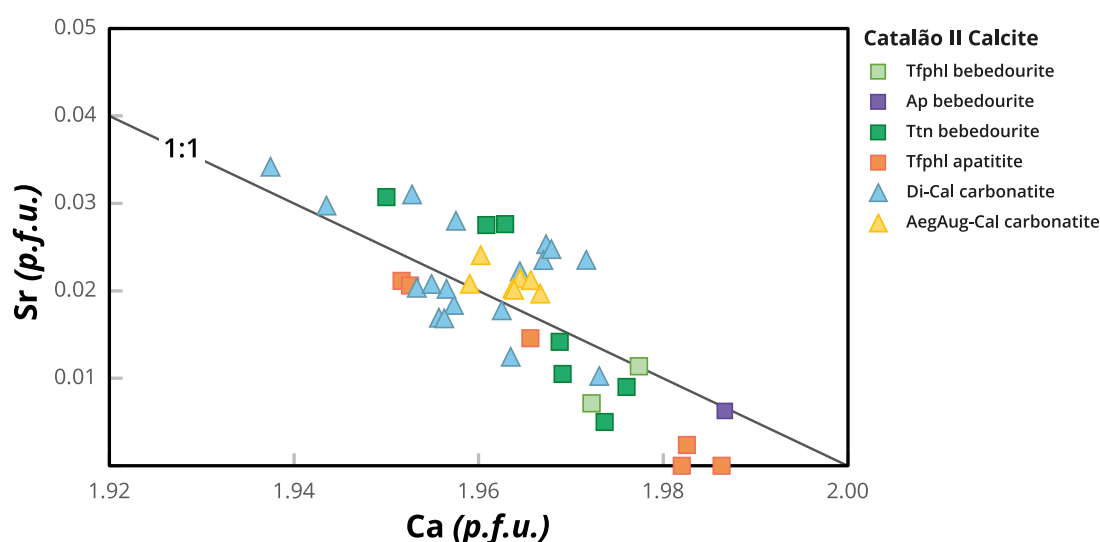


Fig. 3.12 Ca and Sr (*a.p.f.u.*) variation for Catalão II calcite showing the general Sr enrichment trend according to the 1:1 substitution line.

Tab. 3.6 Representative calcite analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on 6 oxygens. CO₂ was calculated assuming stoichiometry. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.

Rock Type	Tfphl bebedourite	Ap bebedourite	Tfphl apatitite	Di-Cal carbonatite	Ttn bebedourite	AegAug-Cal carbohatite
Sample	CQP-01	CQP-08	CQP-54	CQP-58	CQP-51	CTII4-184.9
CaO	54.47	52.71	55.15	54.39	53.68	56.10
MgO	0.02	0.01	0.15	0.08	0.15	0.06
FeO	0.14	-	0.26	0.09	0.16	0.13
MnO	0.03	0.04	0.16	0.12	0.18	0.06
SrO	0.58	0.31	0.76	1.14	1.56	1.13
BaO	0.39	0.38	0.05	0.24	0.14	0.46
CO ₂	43.23	41.64	44.04	43.45	43.20	44.82
Total	98.86	95.09	100.56	99.51	99.08	102.75
Structural formulae calculated on the basis of 6 O						
Ca	1.977	1.987	1.966	1.964	1.950	1.965
Mg	0.001	0.001	0.007	0.004	0.008	0.003
Fe	0.004	-	0.007	0.002	0.005	0.003
Mn	0.001	0.001	0.005	0.003	0.005	0.002
Sr	0.011	0.006	0.015	0.022	0.031	0.021
Ba	0.005	0.005	0.001	0.003	0.002	0.006
Total	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000

3.7.5 Fe-Ti OXIDES

Magnetite is present only in stage II rocks defined by the apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatitite, and diopside calcite carbonatite. Broadly for all analyses (n = 90), TiO₂ varies widely from below the detection limit (≤ 0.01 wt.%) in a few samples, up to a peak of 11.0 wt.%. Average TiO₂ contents range from 0.2 to 7.4 wt.%. MgO and MnO compositions also show great variation from below the detection limit up to 1.7 and 1.0 wt.%, respectively. Conspicuously low concentrations are presented for Cr₂O₃ (≤ 0.2 wt.%), Al₂O₃ (≤ 0.05), and NiO (≤ 0.08 wt.%). Representative analyses are given in **Tab. 3.7**.

Although the composition range greatly overlaps between rock units, some slight composition differences can be depicted for magnetite major components. Magnetite in apatite bebedourite has the highest TiO₂ range (0.7-11.0 wt.%), and moderate to high MgO (0.05-1.7 wt.%) and MnO (0.1-1.0 wt.%). Diopside calcite carbonatite TiO₂ (≤ 0.01 -10.8 wt.%) closely resemble the apatite bebedourite Ti range. MgO is characteristically low (≤ 0.01 -0.2 wt.%) and MnO is moderate (≤ 0.02 -0.9 wt.%). Tetraferriphlogopite apatitite has slightly lower TiO₂ (0.2-5.2 wt.%) compared with other units. Moderate to high MgO (0.03-1.7 wt.%) and MnO (0.05-1.0 wt.%) resembles the apatite bebedourite range.

Ilmenite is an accessory phase mainly as exsolved lamellae in magnetite crystals present in apatite bebedourite and diopside calcite carbonatite. No ilmenite lamellae were found in tetraferriphlogopite apatitite within our studied samples, which is in great agreement with its more Ti-depleted magnetite. Ilmenite in apatite bebedourite is characteristically enriched in Fe₂O₃ (4.8-

8.6 wt.%), MgO (1.3-1.6 wt.%), and MnO (1.7-2.3 wt.%), which points to a certain contribution of the hematite (up to 8.2 mol.%), geikielite (MgTiO₃ up to 5.9 mol.%), and pyrophanite (MnTiO₃ up to 5.0 mol.%) solid-solution end-members, respectively. Whereas, diopside calcite carbonatite has lower Fe₂O₃ (2.3-5.8 wt.%) and MgO (0.2-0.3 wt.%), and a relatively high MnO content (1.9-3.1 wt.%), indicating only a significant solid-solution of the hematite (up to 5.5 mol.%) and pyrophanite molecule (up to 6.8 mol.%).

Tab. 3.7 Representative Fe-Ti oxides analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on 4 and 6 oxygens, respectively. Fe²⁺/Fe³⁺ was calculated from stoichiometry. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.

Rock Type	Ap bebedourite	Tfphl apatitite	Di-Cal carbonatite	Ap bebedourite	Di-Cal carbonatite	
Sample	CQP-08	CQP-54	CTII4-408.1	CQP-04	CQP-62	
SiO ₂	0.05	-	0.09	0.00	0.04	
TiO ₂	6.90	2.06	3.03	50.20	50.46	
Al ₂ O ₃	0.02	0.00	-	0.01	0.01	
Fe ₂ O ₃	55.03	64.71	61.84	5.96	3.38	
FeO	36.27	32.84	32.98	40.37	42.00	
MnO	0.78	0.24	0.34	1.95	2.93	
MgO	0.27	0.09	0.15	1.46	0.19	
CaO	0.00	0.01	0.07	0.09	0.10	
Cr ₂ O ₃	0.08	0.13	0.05	0.01	0.05	
V ₂ O ₃	0.66	0.84	0.45	0.35	0.51	
ZnO	0.12	0.02	0.05	0.10	-	
NiO	-	-	-	-	-	
Total	100.18	100.95	99.05	99.90	99.32	
Structural formulae calculated on the basis of 4 and 6 oxygens for magnetite and ilmenite, respectively						
Si	0.002	-	0.003	0.000	0.001	
Ti	0.198	0.059	0.088	0.940	0.961	
Al	0.001	0.000	-	0.000	0.000	
Fe ³⁺	1.577	1.853	1.801	0.112	0.064	
Fe ²⁺	1.156	1.045	1.068	0.841	0.889	
Mn	0.025	0.008	0.011	0.041	0.063	
Mg	0.015	0.005	0.008	0.054	0.007	
Ca	0.000	0.000	0.003	0.002	0.003	
Cr	0.002	0.004	0.001	0.000	0.001	
V	0.020	0.026	0.014	0.007	0.010	
Zn	0.004	0.001	0.002	0.002	-	
Ni	-	-	-	-	-	
Total	3.000	3.000	3.000	2.000	2.000	
% Magnetite	75.9	92.9	89.1	% Hematite	5.6	3.2
% Ulvöspinel	20.1	6.0	8.9	% Ilmenite	84.7	89.7
% Magnesioferrite	1.4	0.3	0.8	% Geikielite	5.5	0.7
% Jacobsite	2.6	0.8	1.1	% Pyrophanite	4.1	6.3

All magnetite analyses extend along the ulvöspinel-magnetite trend ($2\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2 \leftrightarrow \text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). As magnetite composition is virtually Cr and Al-free, no contribution of chromite and spinel end-members was identified. The evolution trend shows a progressive depletion of Ti coupled with an enrichment of Fe^{3+} leading to compositions close to the ideal magnetite molecule (**Fig. 3.13A**). Besides the similar compositional fields for apatite bebedourite and diopside calcite carbonatite, the tetraferriphlogopite apatitite displays a generally more evolved character by the lower Ti range which, additionally, should have constrained the formation of ilmenite exsolution lamellae. Beyond that, Mg and Mn substitution plays a minor contribution to the magnetite composition achieving a maximum of 9.6 mol.% for the magnesioferrite ($\text{MgFe}_2^{3+}\text{O}_4$) and 3.4 mol.% for the jacobsite molecule ($\text{MnFe}_2^{3+}\text{O}_4$), and decreasing within more differentiated crystals. Whereas, MgO content seems to be especially depleted among the carbonatite (≤ 0.2 wt.%).

As demonstrated by Brod *et al.* (2005) in the Tapira complex, spinel group minerals in less differentiated rocks (*e.g.* dunites and wehrlites) are commonly chromite evolving through Cr-Al-poor and Fe^{3+} -Ti-rich spinels by a progressive increase in the ulvöspinel and magnetite end-members. With the depletion of Cr and Al in more differentiated rocks (*e.g.* bebedourites, phoscorites, and carbonatites), the compositional shifts towards a decrease of Ti and in the direction of nearly pure magnetite (**Fig. 3.13B**). In a similar way to what was also described for spinel group minerals in rocks at the Salitre I and Catalão I complexes (Araújo, 1996; Morbidelli *et al.*, 1997; Cordeiro *et al.*, 2010; Barbosa *et al.*, 2012, 2020).

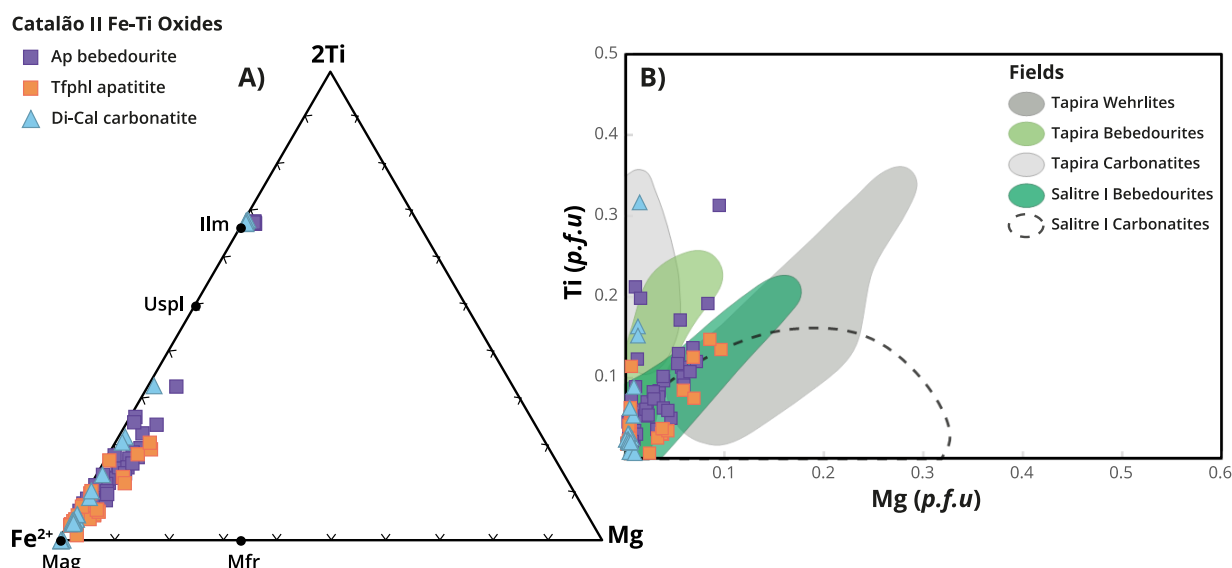


Fig. 3.13 A) Compositional variation of Catalão II Fe-Ti oxides in terms of Ti, Fe^{2+} , and Mg (*a.p.f.u.*). Ideal end-members are plotted for comparison: Ilm – ilmenite, Mag – magnetite, Mfr – magnesioferrite, and Uspl – ulvöspinel. **B)** Mg and Ti (*a.p.f.u.*) variation for magnetite showing the general Ti and Mg depletion trend. Magnetite compositional fields are given for Tapira (Brod *et al.*, 2005) and Salitre I rocks (Barbosa *et al.*, 2012, 2020). Note that less differentiated rocks such as wehrlites have more Ti, and Mg-rich magnetite than related bebedourites and carbonatites.

3.7.6 TITANITE

Titanite is present in all bebedourites and clinopyroxene-bearing carbonatites. They do not occur in association with further Ca-Ti phases as described for bebedourites in other Alto Paranaíba complexes (*i.e.* Catalão I, Tapira, and Salitre I), and therefore no perovskite or Ti-garnet was identified. It can occur as a major constituent for apatite bebedourite and titanite bebedourite, as an accessory mineral in tetraferriphlogopite bebedourite and the carbonatites, and as rare trace crystals in the tetraferriphlogopite apatite.

Titanite compositions are fairly similar among lithologies (n = 60) and representative compositions are presented in **Table 3.8**. Fe₂O₃ plays a major substitution role in titanite composition with contents varying between 1.2 to 2.8 wt.%. Characteristically they also present high grades of Nb₂O₅ (1.5-4.0 wt.%) and ZrO₂ (0.3-2.7 wt.%; **Fig. 3.14**). LREE₂O₃ (La, Ce, Nd) is relatively low ranging from 0.3 to 0.6 wt.%. Among the elements that make up the LREE, Ce₂O₃ is the major constituent (0.2-0.4 wt.%). Na₂O has low contents ranging from 0.07 to 0.9 wt.%. Al₂O₃ and F are usually below the detection limit up to 0.2 and 0.7 wt.%, respectively.

Nb and Zr contents present comparable ranges with titanite from the Kaiserstuhl complex with Nb₂O₅ up to 4.7 wt.% and ZrO₂ up to 4.5 wt.% (Braunger *et al.*, 2018), and higher ranges than those from Oldoinyo Lengai up to 1.1 wt.% and 1.2 wt.%, respectively (Dawson *et al.*, 1994). LREE presents a little lower range than titanites from Salitre I (up to 0.8 wt.%; Barbosa *et al.*, 2012). Furthermore, geochemical trends consistent with Catalão II titanite compositions point to a substitution mechanism in the octahedral site by $2\text{Ti}^{4+} = \text{Nb}^{5+} + (\text{Fe}^{3+}, \text{Zr}^{3+})$, with a lesser contribution of other elements substitution commonly proposed in other works such as REE, Al, Na, and F (Kohn, 2017; Kontonikas-Charos *et al.*, 2019).

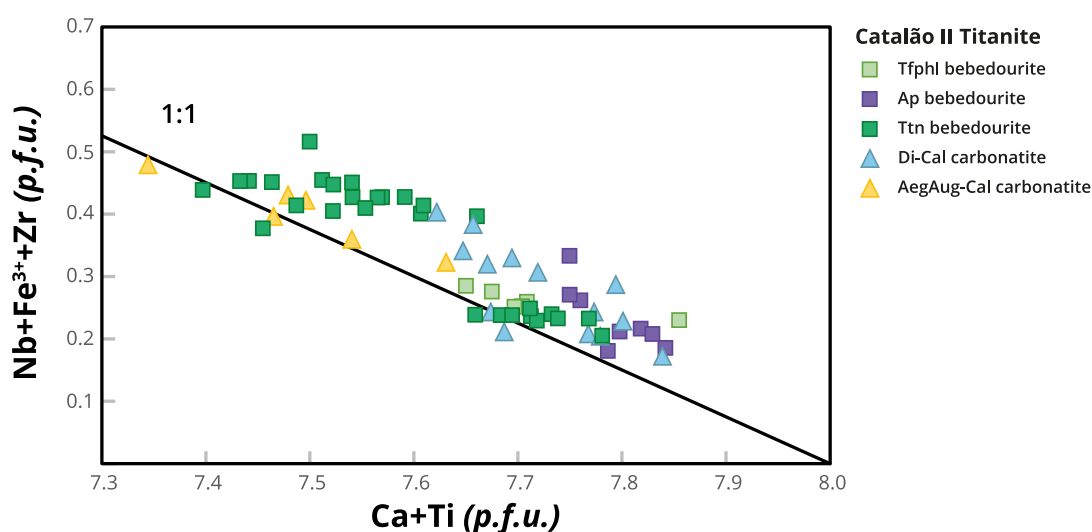


Fig. 3.14 Ca+Ti and Nb+Fe³⁺+Zr (*a.p.f.u.*) variation for Catalão II titanite, showing a general enrichment in Nb, Fe³⁺, and Zr according to a 1:1 substitution line.

Table 3.8 Representative titanite analyses from Catalão II rocks (oxides in wt. %). Structural formulae were calculated based on 20 oxygens. FeO_T from the EPMA data was recast as Fe₂O₃. (-) in the table correspond to analyses below the detection limit. (n.a.) in the table correspond to not analyzed oxides.

Rock Type	Tfphl bebedorite	Ap bebedourite	Di-Cal carbonatite	Ttn bebedourite	AegAug-Cal carbobatite
Sample	CTII4-444.6	CQP-04	CQP97-139.2	CQP97-462.8	CTII4-413.1
SiO ₂	29.64	30.02	29.91	29.03	29.28
TiO ₂	35.18	35.76	35.04	36.13	35.17
Al ₂ O ₃	0.17	0.11	0.12	0.11	0.13
Fe ₂ O ₃	1.54	1.44	2.11	2.21	2.31
MnO	0.03	0.03	0.05	0.06	0.01
MgO	0.03	-	0.03	0.01	0.06
CaO	29.07	28.82	27.85	27.77	27.70
Na ₂ O	0.07	0.08	0.21	0.28	0.43
ZrO ₂	2.70	1.92	0.75	0.77	0.78
Nb ₂ O ₅	n.a.	n.a.	1.61	2.13	2.70
SrO	n.a.	n.a.	-	-	0.03
La ₂ O ₃	n.a.	n.a.	0.07	-	0.02
Ce ₂ O ₃	n.a.	n.a.	0.18	0.24	0.24
Nd ₂ O ₃	n.a.	n.a.	0.05	0.07	0.05
F	-	-	0.26	0.66	0.34
Cl	-	-	0.01	0.02	-
-O = (F,Cl) ₂	-	-	0.11	0.27	0.14
Total	98.94	98.74	98.91	99.35	99.28
Structural formulae calculated on the basis of 20 O					
Ca	4.189	4.142	4.003	3.975	3.976
Na	0.019	0.021	0.054	0.073	0.112
Mn	0.003	0.004	0.005	0.006	0.001
Mg	0.006	-	0.007	0.001	0.013
Sr	n.a.	n.a.	-	-	0.002
La	n.a.	n.a.	0.003	-	0.001
Ce	n.a.	n.a.	0.009	0.012	0.012
Nd	n.a.	n.a.	0.002	0.003	0.002
Ti	3.560	3.608	3.537	3.631	3.545
Al	0.027	0.018	0.019	0.017	0.021
Fe ³⁺	0.156	0.145	0.213	0.222	0.233
Zr	0.177	0.126	0.049	0.050	0.051
Nb			0.098	0.129	0.164
Si	3.986	4.026	4.013	3.878	3.923
F	-	-	0.112	0.280	0.144
Cl	-	0.000	0.002	0.005	-
Total	12.172	12.144	12.195	12.295	12.220

3.7.7 AMPHIBOLE

Amphibole is accessory to rare in the petrographic types. They form fine aggregates with a light blue-green colour usually as overgrowths or in complete replacement of clinopyroxene crystals (**Fig. 3.10D**). The overall chemical composition belongs to the sodic-calcic group $[(Ca+Na)_B \geq 1.0 \text{ and } 0.5 < Na_B < 1.5]$ placed in the richterite compositional space, according to Leake *et al.* (1997) nomenclature. Owing to the high K₂O content (3.7-5.3 wt.%), further classification is required as a potassic-richterite specie $[K(NaCa)Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2]$ (*e.g.* Holtstam *et al.*, 2019). Representative analyses are given in **Tab. 3.9**.

Despite our limited number of analyses ($n = 20$), amphibole composition shows a general Fe- and Na-enrichment trend resembling to a lesser extent the clinopyroxene composition ranges. Mg# [$\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$] varies from 0.68 to 0.98 at nearly constant Na+K contents. MnO is low to moderate (0.15-1.0 wt.%). Na_2O ranges from 3.1 to 6.0 wt.% and CaO from 2.8 to 5.6 wt.%. In that sense, major coupled substitutions in amphiboles can be represented by $\text{Mg} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(+\text{Mn})$ (**Fig. 3.15A**) and $\text{Ca} \rightarrow \text{Na}$ (**Fig. 3.15B**). F occur at a wide range (0.7-2.3 wt.%). Low contents are presented for Al_2O_3 (≤ 0.5 wt.%) and TiO_2 (≤ 0.6 wt.%).

Amphiboles in the Alto Paranaíba complexes are only reported for Araxá as anthophyllite and magnesio-arfvedsonite in carbonatites, glimmerites, and pyroxenitic rocks (Traversa *et al.*, 2001). The presence of richterite-type amphibole is known to occur in phoscorites and carbonatites from Sokli and Kovdor in the Kola Province (Vartiainen, 1980; Krasnova *et al.*, 2004b; Reguir *et al.*, 2012), from Yraas and Kugda in the Maymecha-Kotuy Province (Yegorov, 1993), and in alkali syenites from the Ipanema complex in the Ponta Grossa Arch Province (Guarino *et al.*, 2012). Amphiboles from the Ipanema complex show similar composition trends with Catalão II by a Fe- and alkali-enrichment from sodic-calcic to sodic varieties ranging between potassic richterite ($\text{Mg\#} = 0.80\text{-}0.81$) to magnesio-arfvedsonite ($\text{Mg\#} = 0.77\text{-}0.89$).

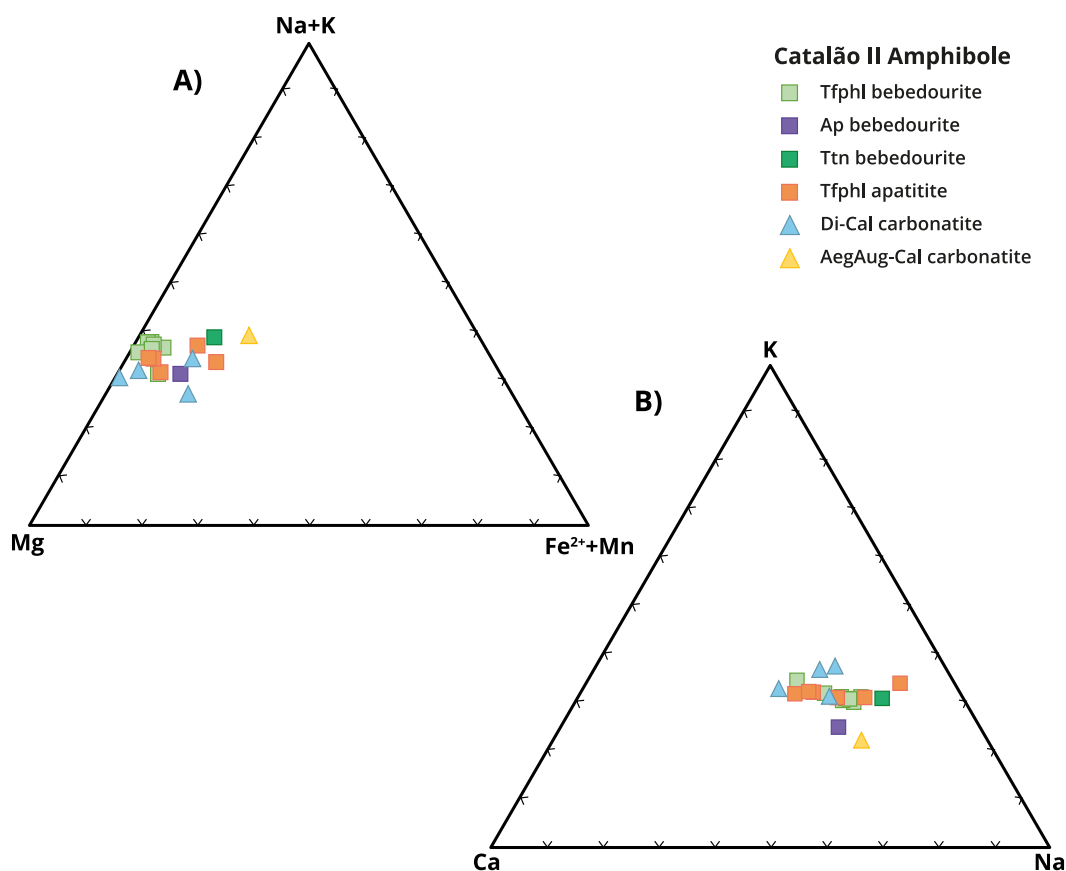


Fig. 3.15 A) Compositional variation for Catalão II amphiboles in terms of Na+Ca, Mg, and $\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}$ (*a.p.f.u.*), showing the general Mg decrease coupled with a Fe^{2+} enrichment. **B)** Compositional variation in terms of K, Ca, and Na (*a.p.f.u.*), showing the Ca decrease and respective Na increase.

Tab. 3.9 Representative amphibole analyses from Catalão II rocks. Structural formulae were calculated based on 23 oxygens. Fe₂O₃ and FeO were recalculated according to Schumacher (1997). (-) in the table correspond to analyses below the detection limit.

Rock Type	Tfphl bebedorite	Ap bebedourite	Tfphl apatitite	Di-Cal carbonatite	Ttn bebedourite	AegAug-Cal carbonatite
Sample	CQP-01	CQP-08	CQP-57	CQP-63	CQP97-436.7	CTII4-413.1
SiO ₂	55.79	57.41	53.98	54.70	53.52	49.53
TiO ₂	0.31	0.36	0.57	0.43	0.33	0.14
Al ₂ O ₃	0.25	0.24	0.26	0.09	0.25	0.22
Fe ₂ O ₃	4.53	5.99	7.96	6.70	4.80	0.63
FeO	5.52	5.15	5.55	5.70	9.68	14.29
MnO	0.27	0.19	0.28	0.15	0.42	0.41
MgO	17.88	18.45	15.39	16.17	14.82	11.67
CaO	4.85	4.69	3.25	4.46	2.81	4.47
Na ₂ O	3.61	5.12	5.30	4.68	5.92	6.09
K ₂ O	5.08	3.91	4.88	4.97	5.10	3.74
F	1.56	0.71	1.10	1.06	0.78	0.92
Cl	-	0.003	-	-	0.01	0.04
-O = (F,Cl) ₂	0.78	0.35	0.55	0.53	0.39	0.46
Total	98.85	101.86	97.98	98.59	98.05	91.70
Structural formulae calculated on the basis of 23 O (O, F,Cl)						
Si	8.046	7.980	7.956	7.992	7.898	7.927
Al	0.000	0.020	0.044	0.008	0.044	0.042
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.017
ΣT	8.046	8.000	8.000	8.000	7.979	7.986
Al	0.04	0.02	0.00	0.008	0.000	0.000
Ti	0.03	0.04	0.06	0.047	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.75	0.51	0.87	0.690	0.867	0.731
Fe ²⁺	0.33	0.61	0.68	0.733	0.861	1.257
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.056
Mg	3.844	3.824	3.382	3.521	3.260	2.785
ΣC	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	4.828
Ca	0.749	0.698	0.513	0.698	0.445	0.766
Na	1.009	1.174	1.436	1.274	1.515	1.234
Fe ²⁺	0.077	0.106	0.016	0.010	0.000	0.000
Mn	0.033	0.022	0.036	0.018	0.040	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΣB	1.868	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na	0.000	0.204	0.078	0.053	0.180	0.657
K	0.935	0.693	0.918	0.926	0.960	0.763
ΣA	0.935	0.898	0.995	0.980	1.139	1.420
OH	1.291	1.688	1.485	1.509	1.637	1.522
Cl	-	0.001	-	-	0.001	0.012
F	0.709	0.311	0.515	0.491	0.362	0.466
ΣOH	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Mg/(Mg+Fe²⁺+Mn)	0.90	0.84	0.82	0.82	0.78	0.68

3.8 WHOLE-ROCK GEOCHEMISTRY

Bulk rock major and trace element compositions were obtained for 26 samples. Although whole-rock composition for plutonic and modally heterogeneous rocks by mineral accumulation effects does not represent liquid compositions, important additional information can be depicted for purposes of rock characterization. Petrographically diverse samples with similar patterns and to grouped within cogenetic rock units with additional information from mineral composition as discussed in previous sections. Average major composition ranges are given in **Table 3.10** and trace-element ranges in **Tab. 3.11**.

Harker variation diagrams are illustrated in **Fig. 3.16**. In terms of major composition, Al_2O_3 is characteristically very low (below 2.0 wt.%), except for tetraferriphlogopite bebedourite (up to 5.3 wt.%). Alkalis concentration ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) is usually higher than 2.5 wt.% and up to 6.7 wt.% in bebedourites and apatitite, consistently with the high modal proportion of micas. Alkalis concentration in clinopyroxene calcite carbonatites is lower-ranging from 0.5 to 3.4 wt.%. Tetraferriphlogopite bebedourite has higher MgO, SiO_2 , and Al_2O_3 contents. Apatite bebedourite and titanite bebedourite composition ranges fairly overlap. However, apatite bebedourite tends to be slightly more enriched in MgO, and titanite bebedourite is more enriched in Na_2O possibly reflecting the composition of clinopyroxene that is diopside in the first and with a more aegirine component in the later. P_2O_5 is high in both apatite bebedourite (up to 21.8 wt.%), titanite bebedourite (up to 18.1 wt.%), and tetraferriphlogopite apatitite (up to 22.7 wt%) as evidence of the high apatite component. SiO_2 and MgO decrease from apatite bebedourite, towards more silica-poor varieties, and tetraferriphlogopite apatitite. Diopside calcite carbonatite has a high variation for all elements as an effect of the presence of high and poor silicate varieties. Aegirine-augite calcite carbonatite is generally more SiO_2 (up to 20.7 wt.%) than the diopside calcite carbonatite. Considering the absence of olivine and Cr-rich spinel, Cr and Ni are very low for all units usually below 30 and 25 ppm, respectively, with one anomalous tetraferriphlogopite bebedourite sample reaching up to 1485 ppm.

Rare earth element (REE) patterns show a fractionated feature from light relative to the heavy rare earth elements for all units (**Fig. 3.17A**). Tetraferriphlogopite bebedourite has a conspicuous lower REE and lesser fractionated patterns ($\text{La}_{(\text{N})}/\text{Lu}_{(\text{N})} = 26\text{--}47$). A particular concave-upward pattern can be depicted for tetraferriphlogopite bebedourite with the middle REE slightly depleted in comparison with heavy REE, possibly as an effect of contamination by basement rocks. Apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatitite, and diopside calcite carbonatite REE patterns greatly overlap, with diopside calcite carbonatite having a little narrow and lower REE range. Apatite bebedourite and diopside calcite carbonatite $\text{La}_{(\text{N})}/\text{Lu}_{(\text{N})}$ ratios are quite similar

ranging from 115 to 259, and from 145 to 249, respectively. The tetraferriphlogopite apatite ratio is the highest ($\text{La}_{\text{(N)}}/\text{Lu}_{\text{(N)}} = 195\text{-}298$), possibly reflecting the major apatite accumulation. Titanite bebedourite and aegirine-augite calcite carbonatite also have overlapping patterns quite similar to the last units, although with a generally higher range. Titanite bebedourite $\text{La}_{\text{(N)}}/\text{Lu}_{\text{(N)}}$ ratio ranges from 77 to 111, and the aegirine-augite calcite carbonatite ratio is a little higher from 145 to 213.

Incompatible element patterns are shown in **Fig. 3.17B**. Tetraferriphlogopite bebedourite is characterized by negative Th and Ti anomalies, and relatively small Zr-Hf positive anomalies, with one divergent sample showing negative Ta and P anomalies. Incompatible element patterns are similar among apatite bebedourite and titanite bebedourite. Although titanite bebedourite tends to have an average higher trace element content, both show negative K, Sr, and Ti, and positive Th, Nb-Ta, P, and Zr-Hf anomalies. Tetraferriphlogopite apatite also shows negative Sr and positive P anomalies. However, in contrast with bebedourites, they present slightly negative Th, strongly negative Zr-Hf-Ti, and positive La-Ce anomalies. Both carbonatites do not show Nb-Ta and Zr-Hf positive anomalies. The diopside calcite carbonatite has negative K, P, and Ti. Whereas, Ta contents are variable from positive to negative anomalies in more silicate-poor samples. Aegirine-augite calcite carbonatite shows a general depletion in high field strength elements from Ba to Ta, and a negative Ti anomaly.

The distribution of the incompatible elements may be strongly controlled by inherited features from parental magmas or by the contribution of specific mineral accumulation. Nb-Ta and Zr-Hf positive anomalies are most conspicuous in samples associated with an increasing titanite content, in accordance with the general high Nb and Zr titanite composition for Catalão II rocks (Section 3.7.6). The Th distribution should also be explained by the titanite presence, considering the similar geochemistry behaviour with Nb and Zr. Other accessory minerals such as zircon, zirconolite, and wadeite must have played a minor contribution in the formation of those distinctive Nb-Ta, Zr-Hf, and Th highs presented by Catalão II bebedourites and carbonatites. The calcite extraction may promote some Sr depletion recognized in bebedourites and apatite in counterpart with the flat pattern presented in both carbonatites, which is in good agreement with the presence of Sr-poor apatite and Sr-rich calcite as shown in section 3.7.

As pointed out by Brod *et al.* (2013), the P_2O_5 highs can be attributed to the high modal proportions of apatite and, therefore, the opposite is logically expected from apatite-poor counterparts, as seen in the diopside calcite carbonatite. In parallel, La and Ce positive anomalies could be depicted in cases where extensive apatite concentration occurs, as in the tetraferriphlogopite apatite. The ubiquitous negative Ti anomaly in all rocks is quite contradictory, especially in high titanite samples. However, this feature can indicate perovskite

fractionation during earlier-stage magmas as demonstrated by Brod *et al.* (2013) in the Tapira complex, leading to the formation of more primitive facies that are not present in the current level of erosion in Catalão II.

Negative K anomaly is an effect of the contrast with the high Th and Nb positive peaks and is unlikely to be from a potassic mineral concentration since most of the rocks are mica-rich. From that perspective, the absence of positive Nb-Ta anomalies, the strong negative Th, and consequently the absence of a negative K in tetraferriphlogopite bebedourite, could be explained by some contribution of titanite removal from the magma.

Tab. 3.10 Major whole-rock composition averages and ranges of Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites.

Rock Type	Tfphl Bebedourite (n = 3)		Ap Bebedourite (n = 3) Cpx-rich variety		Ap Bebedourite (n = 3) Ap-rich variety		Tfphl apatitite (n = 5)	
	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range
SiO ₂	44.07	42.8-45.3	31.64	30.4-33.1	17.67	14.3-20.6	15.17	9.4-18.9
TiO ₂	0.52	0.3-0.9	3.68	1.7-5.4	1.74	0.7-2.3	2.08	0.8-4.5
Al ₂ O ₃	3.01	1.1-5.3	0.91	0.1-1.4	0.40	0.3-0.5	0.63	0.1-2.0
Fe ₂ O ₃	13.30	11.9-16	14.40	11.3-18.9	21.58	11.9-26.7	25.05	15.8-49.5
MnO	0.38	0.2-0.6	0.17	0.16-0.18	0.20	0.1-0.2	0.20	0.1-0.3
MgO	13.58	10.7-17	10.48	9.9-11.0	6.62	4.8-8.2	7.84	7.2-8.7
CaO	13.43	10.3-15.8	24.17	23.8-24.6	27.43	21.8-32.7	23.66	14.1-30
Na ₂ O	2.09	0.9-3.0	0.64	0.5-0.9	0.68	0.5-0.9	0.14	0.07-0.2
K ₂ O	4.13	3.2-5.7	1.69	0.8-2.3	2.17	1.5-2.8	3.75	2.3-4.7
BaO	0.06	0.03-0.09	0.07	0.06-0.08	0.05	0.05-0.06	0.09	0.04-0.1
SrO	0.15	0.07-0.19	0.19	0.18-0.22	0.31	0.2-0.3	0.34	0.2-0.5
P ₂ O ₅	0.68	0.19-1.2	8.51	7.3-9.6	17.25	12.8-21.8	17.44	10.1-22.7
C	0.87	0.1-1.3	0.60	0.5-0.8	0.52	0.3-0.7	0.48	0.3-0.7
S	0.01	<0.01-0.01	0.41	0.04-1.1	0.26	0.03-0.4	0.91	0.06-2.8
LOI	4.13	1.3-6.2	1.94	1.4-2.2	1.75	1.6-1.9	1.81	1.1-3.5
Total	100.42	98.9-100.7	99.50	99.1-101.0	98.64	98.3-99.6	99.60	99.3-101.9

Rock Type	Di-Cal Carbonatite (n = 3) Silicate minerals-rich variety		Di-Cal Carbonatite (n = 4) Silicate minerals-poor variety		Ttn Bebedourite (n = 3)		AegAug-Cal Carbonatite (n = 2)	
	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range
SiO ₂	14.26	13.7-15.0	3.83	1.4-8.3	27.09	23.7-29.7	15.83	11.0-20.7
TiO ₂	2.40	2.3-2.4	0.46	0.4-0.5	4.77	1.8-10.2	0.55	0.5-0.6
Al ₂ O ₃	0.93	0.7-1.0	0.22	0.01-0.8	1.29	0.4-1.9	1.05	1.0-1.1
Fe ₂ O ₃	11.18	10.1-12.3	9.06	5.9-15.1	10.54	8.2-13.3	9.31	7.9-10.7
MnO	0.15	0.14-0.15	0.12	0.09-0.16	0.18	0.1-0.2	0.18	0.1-0.2
MgO	4.57	4.2-4.9	1.95	1.4-3.4	6.20	4.1-8.4	3.51	2.7-4.3
CaO	35.60	35-36	44.25	40.4-47.5	26.47	20.6-30.7	36.70	33.3-40.1
Na ₂ O	0.40	0.2-0.7	0.22	0.05-0.6	1.32	0.8-1.8	0.80	0.4-1.2
K ₂ O	2.28	1.6-2.9	0.99	0.4-2.2	2.72	1.2-4.7	1.99	1.8-2.2
BaO	0.21	0.17-0.28	0.38	0.3-0.4	0.11	0.06-0.17	0.31	0.29-0.33
SrO	0.79	0.7-0.8	1.34	1.3-1.3	0.36	0.3-0.5	1.07	0.1-1.2
P ₂ O ₅	2.63	1.8-3.4	1.10	0.5-2.0	11.10	5.7-18.1	3.51	3.3-3.7
C	6.40	6.3-6.5	9.45	9.0-10.2	1.27	0.3-2.7	6.92	5.8-8.0
S	0.16	0.07-0.3	1.51	0.07-5.1	0.03	0.01-0.07	0.23	0.05-0.4
LOI	23.77	22.9-24.4	32.02	23.0-37.4	5.27	1.8-10.5	24.19	20.7-27.7
Total	105.71	99.1-100.2	106.89	98.8-100.8	98.72	99.0-99.3	106.12	99.5-100.2

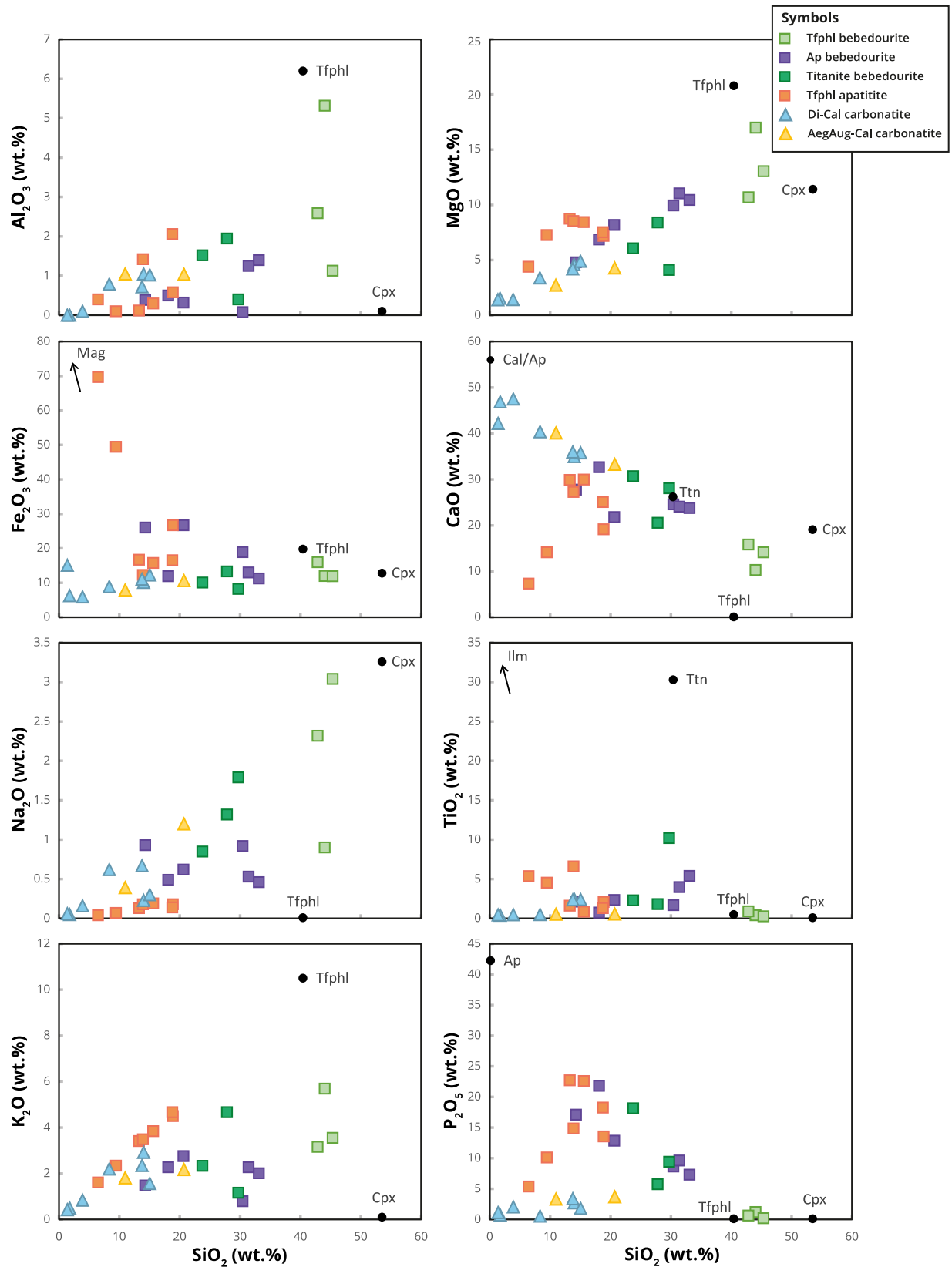


Fig. 3.16 Harker variation diagram for Catalão II bebedourites, apatite, and clinopyroxene calcite carbonatites. The average composition of major mineral components is plotted for comparison (*i.e.* Cpx – clinopyroxene, Tfphl – tetraferriphlogopite, Mag – magnetite, Cal – calcite, Ap – apatite, Ttn – titanite, Ilm – ilmenite).

Tab. 3.11 Trace-element composition averages and ranges of Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites. *Pm calculated based on the geometric mean between Nd and Sm.

Rock Type	Tfphl Bebedourite (n = 3)		Ap Bebedourite (n = 6)		Tfphl apatitite (n = 5)		Di-Cal Carbonatite (n = 6)		Ttn Bebedourite (n = 3)		AegAug-Cal Carbonatite (n = 2)	
Element (ppm)	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range	Average	Range
Cr	502.7	5-1485	23.3	<10-30	30.0	10-60	18.3	6-30	18.7	16-23	5.0	5-5
Ni	142.7	1-422	7.0	2-11	12.2	3-29	15.8	<1-26	22.3	20-26	13.5	13-14
Rb	153.2	102.5-198.5	79.1	20.5-112	179.2	92.9-255	67.9	26.3-128	107.0	33.1-181	89.5	84.1-94.9
Y	10.5	9.5-12.1	45.8	25.3-73.6	47.6	25-72.9	36.7	23.4-46.8	64.5	51.1-90.9	41.8	40-43.5
Zr	443.7	222-824	2595.8	1075-7440	549.4	122-975	516.9	54-1035	6110.0	6110->10000	1360.0	1330-1390
Nb	93.9	72.6-127	231.8	45.5-911	164.6	67.1-268	513.3	78.9-1250	2067.9	758-4564.8	73.4	42.7-104
La	73.2	54.3-104.5	353.9	181.5-473	453.4	226-804	410.1	308-576	444.7	395-533	517.5	461-574
Ce	168.2	139-223	913.3	436-1195	1068.0	507-1820	849.3	670-1145	1141.7	935-1465	1055.5	956-1155
Pr	19.5	15.85-24.4	111.3	55.4-152	128.8	60.7-212	89.8	63.9-121	142.0	107-191.5	111.5	103.5-119.5
Nd	73.7	58.7-86.8	443.5	222-635	489.8	229-768	316.6	210-413	557.3	405-764	389.5	356-423
*Pm	27.3	22.5-31.9	168.7	85.2-252	181.8	86.8-283.3	117.1	80.6-139.5	206.5	146.6-287.2	133.5	124.3-142.6
Sm	10.1	8.61-11.7	64.2	32.7-100	67.5	32.9-104.5	38.5	22.6-50.1	76.5	53.1-108	45.8	43.4-48.1
Eu	2.4	2-2.6	15.4	8.1-25.2	15.5	7.8-23.8	9.1	5.6-11.8	17.6	11.35-26	10.3	9.3-11.3
Gd	6.0	5.3-6.3	36.4	18.7-57.9	36.9	19.6-55.9	21.3	12.2-28.5	42.1	28.9-58.4	25.4	24.6-26.2
Tb	0.6	0.5-0.7	3.7	1.9-6.3	3.8	2-5.8	2.3	1.3-3	4.5	3-6.4	2.8	2.7-2.8
Dy	3.0	2.4-3.7	16.5	8.8-28.6	16.1	8.4-24.1	10.1	5.8-13.4	19.1	14.1-27	11.6	11.4-11.6
Ho	0.5	0.4-0.5	2.1	1.1-3.6	2.1	1.2-3.1	1.4	0.8-1.9	2.9	2.2-4	1.8	1.8-1.9
Er	1.0	0.9-1.2	4.3	2.4-7.7	4.1	2.3-6	3.1	1.96-3.8	6.1	4.9-8.5	3.5	3.5-3.6
Tm	0.1	0.12-0.16	0.4	0.24-0.77	0.4	0.18-0.53	0.3	0.23-0.39	0.7	0.52-1.06	0.4	0.36-0.41
Yb	1.0	0.6-1.3	1.9	1.2-3.4	1.8	0.8-2.7	1.7	1.2-2.2	3.6	2.7-4.9	2.0	1.9-2
Lu	0.2	0.12-0.24	0.2	0.12-0.37	0.2	0.11-0.26	0.2	0.18-0.3	0.5	0.38-0.72	0.3	0.28-0.33
Hf	12.9	6.8-22.9	64.6	24.5-194	11.5	3-21.6	12.0	2-20	262.0	135-423	23.0	19.5-26.4
Ta	4.9	0.4-8.4	32.0	1.6-144.5	9.5	4.6-14	42.9	1.6-98.3	293.2	96.6-579	8.4	6.6-10.1
Th	4.9	2.9-6.2	56.5	11-223	11.5	5.4-23.3	18.0	7.6-42.3	39.8	18.3-54.1	11.8	7.5-16.1
Rb/Sr	0.16	0.06-0.31	0.04	0.01-0.05	0.06	0.04-0.11	0.01	0.003-0.02	0.03	0.01-0.04	0.01	0.01-0.01
Gd/Lu	37.1	22.2-51.7	174.8	125-210.5	196.7	155.8-266.2	99.5	68.3-121.4	80.4	57.8-102.4	84.1	74.5-93.6

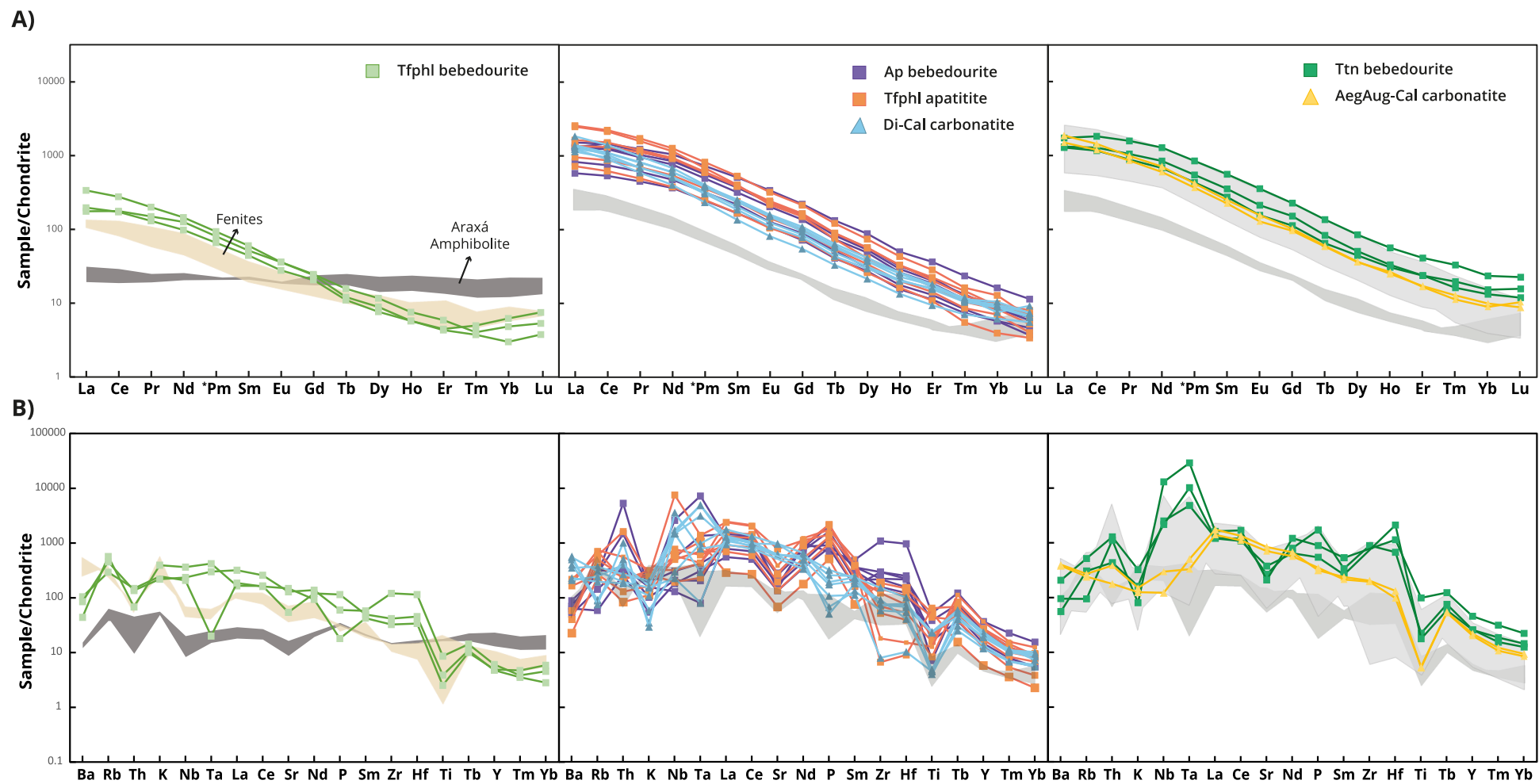


Fig. 3.17 A) Chondrite-normalized REE patterns of Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites. Normalization factors from Boynton (1984). **B)** Chondrite-normalized incompatible element distribution. Normalization factors from Thompson *et al.* (1984). *Pm calculated based on the geometric mean between Nd and Sm. Catalão II fenite field is plotted for comparison. Fenites trace-element analyses are available on supplementary data (Table J). Araxá amphibolite data from Klein (2008). Shaded fields in the following diagrams represent previous unit ranges.

3.10 DISCUSSION

3.10.1 NOMENCLATURE CONSIDERATIONS

A nomenclature discussion involves the utilization of the bebedourite term, which is not foreseen by the IUGS igneous rocks classification (Le Maitre *et al.*, 2002). Bebedourites were defined in the Salitre complex to detail a suite of feldspathoid-lacking titanium-rich clinopyroxenite rocks closely related to the kamafugite-carbonatite magmatism in the Alto Paranaíba Igneous Province (Gibson *et al.*, 1995; Brod *et al.*, 2000; Ruiz *et al.*, 2022). The term was initially defined for rocks with similar modal proportions of phlogopite and clinopyroxene (Tröger, 1928; Brigatti *et al.*, 1996; Morbidelli *et al.*, 1997), and after to include perovskite-rich varieties (Brod *et al.*, 2005, 2013). More recently, an extensive nomenclature revision was provided by Barbosa *et al.* (2012), and as demonstrated by the authors a great proportion of the petrographical varieties in these rocks do not contain clinopyroxene over 50 vol.% and, therefore, are not suitable to a classification as a clinopyroxenite.

Following the IUGS classification criteria, the only approach possible should be to subdivide those rocks into petrographical lithotypes according to the most abundant rock-forming mineral with additional mineral qualifiers in order of increasing abundance. The major problem with this approach is that it would result in an impractical and factorial amount of petrographic lithotypes. For example, in the Catalão II complex, tetraferriphlogopite bebedourite would be a tetraferriphlogopite clinopyroxenite and a clinopyroxene tetraferriphlogopitite. Titanite bebedourite would be a titanite apatite clinopyroxenite and a tetraferriphlogopite clinopyroxene titanitite. Apatite bebedourite would be magnetite tetraferriphlogopite apatite clinopyroxenite, tetraferriphlogopite clinopyroxene apatitite, and other variations. In Salitre I, Barbosa *et al.* (2012) also show every combination possible between major clinopyroxene, olivine, phlogopite, apatite, perovskite, and magnetite, all with consanguineous mineral chemistry and whole-rock footprints.

Therefore, whereas ijolites and melilitolites are ultramafic suites in feldspathoid-bearing carbonatite complexes, we consider the bebedourite nomenclature is the most straightforward form to describe such peculiar alkaline ultramafic rocks in a comprehensive aggrupation of modal variations between cogenetic cumulates. In that sense, we corroborate with the bebedourite nomenclature that has been proposed for Alto Paranaíba alkaline complexes by Barbosa *et al.* (2012) and also utilized in previous works (Brigatti *et al.* 1996; Morbidelli *et al.* 1997; Brod *et al.*, 2005, 2013). However, we should address minor modifications in the definition by Barbosa *et al.* (2012) to include late bebedourites types that are present in the Catalão II complex, by the presence of aegirine-augite and major tetraferriphlogopite. Therefore, the term bebedourite should designate

a suite of consanguineous cumulate rocks consisting of diverse modal proportions of clinopyroxene (diopside and/or aegirine-augite), olivine, mica (phlogopite and/or tetraferriphlogopite), apatite, magnetite, and a Ca-Ti phase (perovskite, Ti-garnet, and/or titanite).

Within the Coqueiros deposit, a certain facies of Catalão II bebedourites is strongly enriched in apatite and its average mineral composition resembles more a phoscorite than a traditional ultramafic outer ring of carbonatite complexes, as shown in Krasnova *et al.* (2004b). Unlike olivine phoscorites and tetraferriphlogopite phoscorites from Catalão I and II, these rocks are pyroxene-bearing and their field mapping, petrographic features, mineral, and whole-rock composition resemble that of bebedourites. Although Krasnova *et al.* (2004a) suggest the inclusion of diopside-bearing apatite-rich rocks from the Kola Province within the phoscorite nomenclature, phoscorites are usually related to a crystallization sequence represented by an olivinite (*i.e.* magnetite dunite), *strictu sensu* olivine phoscorite, towards olivine-lacking and mica-rich phoscorites as demonstrated in the Kovdor and Catalão I (Krasnova *et al.*, 2004b, Cordeiro *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2017).

Consequently, we consider that the phoscorite nomenclature needs revision that is beyond the scope of this work, to regard newer examples described in the last few years (Barbosa *et al.*, 2020; Prokopyev *et al.*, 2021; Savko *et al.*, 2023) and to clarify olivine-poor and possible clinopyroxene-bearing varieties. An all-encompassing review of apatite-rich rocks nomenclature is still pending in the international literature and it would demand the combined experience of various research groups, each with a piece of the puzzle. Pending a broader review of the genetic meaning of phoscorites and their formation mechanisms.

3.10.2 CONSTRAINTS ON THE ORIGIN OF CATALÃO II BEBEDOURITES AND CLINOPYROXENE CALCITE CARBONATITES

The Catalão II magmatic system expressed through the southern and northern portion of the complex displays strong differences that can be derived from multistage emplacement of variably differentiated magma batches. The southern sector is mostly composed of evolved rock types emplaced as extensive carbonatite and tetraferriphlogopite phoscorite dike swarms and may represent the apical portion of a deeper intrusion (Palmieri *et al.*, 2022). The northern sector is a multi-stage magmatic pipe dominated by bebedourites and clinopyroxene calcite carbonatites. Differences in the mode of emplacement and predominant rock types suggest that the northern Catalão II represents a deeper level of emplacement, although both portions are currently in the same level of erosion.

Catalão II North shows at least three bebedourite stages, two of them paired with a respective clinopyroxene-bearing calcite carbonatite. Characteristically, Catalão II bebedourites

are titanite-bearing and olivine-free varieties, which present a generally more evolved character in comparison with ultramafic rocks in other Alto Paranaíba complexes (Araújo, 1996; Brod *et al.*, 2005, 2013; Grasso, 2010; Barbosa *et al.*, 2012), by a higher silica activity expressed through titanite instead of perovskite, a very low Al₂O₃ content reflected in the formation of tetraferriphlogopite mica, and higher Na₂O that lead to the evolution from diopside towards aegirine-augite.

The ultramafic-carbonatite association in Catalão II represents the result of a complex differentiation of a mixed silicate-carbonate melt extremely rich in alkalis, phosphorus, and CO₂. A possible parental magma should be similar to the ultramafic lamprophyres which can be considered the least evolved rocks in the area, as earlier suggested by Brod *et al.* (2013) for the Tapira complex. The ultramafic lamprophyres were described in previous works as “phlogopite picrites”, but after the integration of ultramafic lamprophyres into the IUGS classification of igneous rocks (Tappe *et al.*, 2005), a better fit should be addressed as an olivine aillikite (Ruiz *et al.*, 2022). They are fine-grained dykes and plugs composed of olivine and phlogopite macrocrysts in a groundmass of phlogopite, calcite, accessory spinel, perovskite, apatite, and rare garnet and clinopyroxene (Gibson *et al.*, 1995; Guarino *et al.*, 2013). Compositionally, they are silica undersaturated (29.3-31.7 wt.% SiO₂), with high potassium (3.3-4.6 wt.% K₂O), phosphorus (1.7-3.4 wt.% P₂O₅), and volatiles (9.2-10.9 wt.% LOI; Guarino *et al.*, 2013).

The rare-earth element distribution also provides strong evidence for the correlation with a parental lamprophyre-type magma. Rare-earth element patterns normalized to the composition provided by Guarino *et al.* (2013) are illustrated in **Fig. 3.18**. All of the samples exhibit a prominent flat pattern. Tetraferriphlogopite bebedourite generally shows low REE abundances, with a slight HREE enrichment (*i.e.* Yb and Lu). The lower REE abundance is most likely due to the presence of only accessory REE-rich minerals, such as apatite and titanite. The distinct HREE enrichment must be attributed to contamination from basement rocks, as indicated by the higher HREE composition in fenites and Araxá amphibolites (**Fig. 3.17A**). Apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and diopside calcite carbonatite show flat patterns ranging from around one to five times enriched samples. The same range is observed for titanite bebedourite and aegirine-augite carbonatite with a slight tendency for these later rocks to present higher REE abundances.

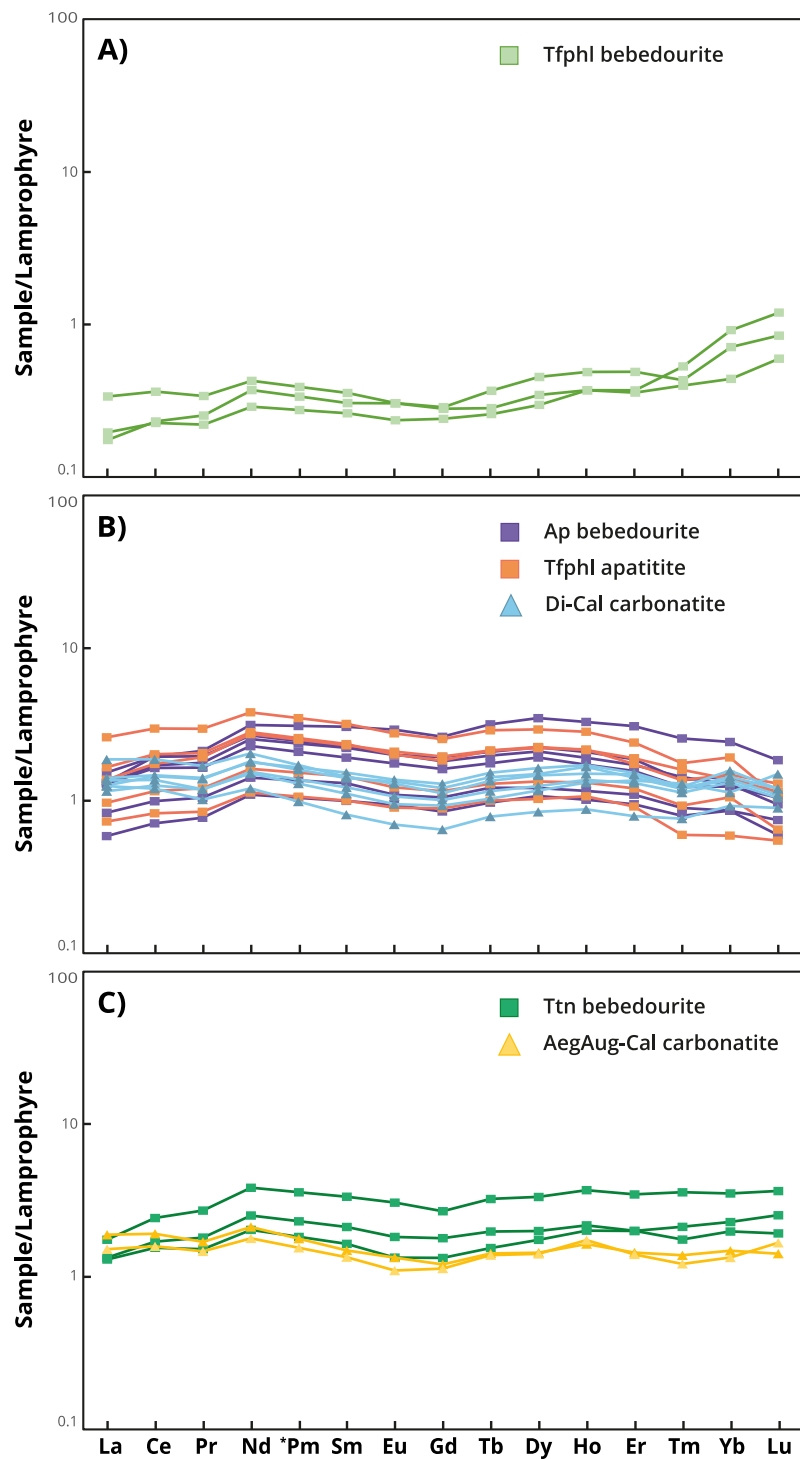


Fig. 3.18 REE patterns of Catalão II bebedourites, apatitite, and clinopyroxene calcite carbonatites normalized from a medium ultramafic lamprophyre composition calculated from data available by Guarino *et al.* (2103). *Pm calculated based on the geometric mean between Nd and Sm.

Based on cross-cutting relationships, we interpret the tetraferriphlogopite bebedourite bordering Catalão II North and in contact with basement rocks as the first cumulates formed from an early-stage magma injection (**Fig. 3.19A**). Several lines of evidence indicate a magmatic origin for the tetraferriphlogopite bebedourite. Noteworthy features include the presence of magmatic banding and cumulatic textures. Mica composition is Al_2O_3 -poor (less than 9.7 wt.%), unlike fenites where Al_2O_3 contents can reach up to 17.4 wt% (Ruiz *et al.*, 2024b). Further mica compositional variation follows the magmatic trend observed in other Catalão II bebedourites by a depletion in Mg and Al coupled with a respective enrichment in Fe^{+3} and Fe^{2+} , from locally phlogopite cores to more Fe^{2+} -rich tetraferriphlogopite.

Nonetheless, interaction with country rock must have contributed to tetraferriphlogopite bebedourite magmatic evolution by crustal contamination. Tetraferriphlogopite bebedourite presents frequent orthoclase-rich xenoliths. Whole-rock composition shows higher SiO_2 (up to 45.3 wt.%) and Al_2O_3 (up to 5.3 wt.%) contents compared with other bebedourites (**Fig. 3.16**). REE distribution displays a relatively HREE-enriched pattern consistent with the HREE abundance in fenites and Araxá amphibolite (**Fig. 3.17A**). Among trace element ratios considered to constrain crustal contamination (*e.g.* Le Roex *et al.*, 2003; Azzone *et al.*, 2016), tetraferriphlogopite bebedourite has slightly high Rb/Sr (0.06-0.31) and low Gd/Lu ranges (22.2-51.7). Fenites and Araxá amphibolite have comparable Rb/Sr (0.16-0.20 and 0.08-0.15, respectively) and Gd/Lu ratios (16.0-17.9 and 8.7-10.6, respectively). Whereas, other Catalão II bebedourites, apatitite, and carbonatites show a generally low Rb/Sr (less than 0.11) and very high Gd/Lu (53.3-266.2).

After the formation of tetraferriphlogopite bebedourites, a different magma batch was responsible for the crystallization of apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatitite, and diopside calcite carbonatite (**Fig. 3.19B**). Later on, a third batch formed titanite bebedourite and aegirine-augite carbonatite as a slightly more evolved ultramafic-carbonatite pair (**Fig. 3.19C**). In both cases, the predominant evolution mechanism is represented by a gradual removal of clinopyroxene, mica, and apatite cumulates, towards residual calcite carbonatites via fractional crystallization. Mineral composition for major rock-forming minerals (*i.e.* clinopyroxene, mica, apatite, and magnetite) form continuous evolution trends within these lithotypes (**Fig. 3.6, 3.7, and 3.9**). Whole-rock chemistry and trace-element behaviour suggest a strong correlation between pairs of ultramafic cumulates and carbonatites (**Fig. 3.16 and 3.17**) as in the clear progression towards the enrichment of incompatible elements (REE-Sr), CaO, and volatiles, with a respective depletion in MgO, SiO_2 , and Al_2O_3 indicative of fractional crystallization (Gittins, 1989; Bell and Rukhlov, 2004; Wu *et al.*, 2017; Doroshkevich *et al.*, 2017). Otherwise, there is no decoupling of

geochemical pairs, such as Nb-Ta and Zr-Hf, which could be pointed out as evidence of liquid immiscibility (Veksler *et al.*, 1998; Panina and Motorina, 2008; Brod *et al.*, 2013) and, therefore, parental magmas may not have achieved the carbonatite immiscibility gap surface (Lee and Wyllie, 1998).

A metasomatic origin in the sense proposed by Vasyukova and Williams-Jones (2022) is ruled out for apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and titanite bebedourite. Apatite bebedourite comprises stocks, pipes, and local dikes intrusive in the tetraferriphlogopite bebedourite, and the clear magmatic layering forms gradational contacts between apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and diopside calcite carbonatite. Titanite bebedourite and aegirine-augite calcite carbonatite occur as small scale stocks and dikes. There are no disequilibrium textures between bebedourite and carbonatite pairs and clinopyroxene in carbonatites comprises well-formed subhedral crystals.

Metasomatic textures do occur in the complex, represented by late-stage tetraferriphlogopite and amphibole formation after reequilibrium with dolomite carbonatite dikes. Late tetraferriphlogopite occurs as minute flakes in the borders of larger tetraferriphlogopite or clinopyroxene crystals and small amphibole aggregates occur in substitution of clinopyroxene crystals. The metasomatic tetraferriphlogopite composition is very contrasting with magmatic mica by a high MgO and extremely poor Al_2O_3 content closer to the ideal stoichiometric tetraferriphlogopite.

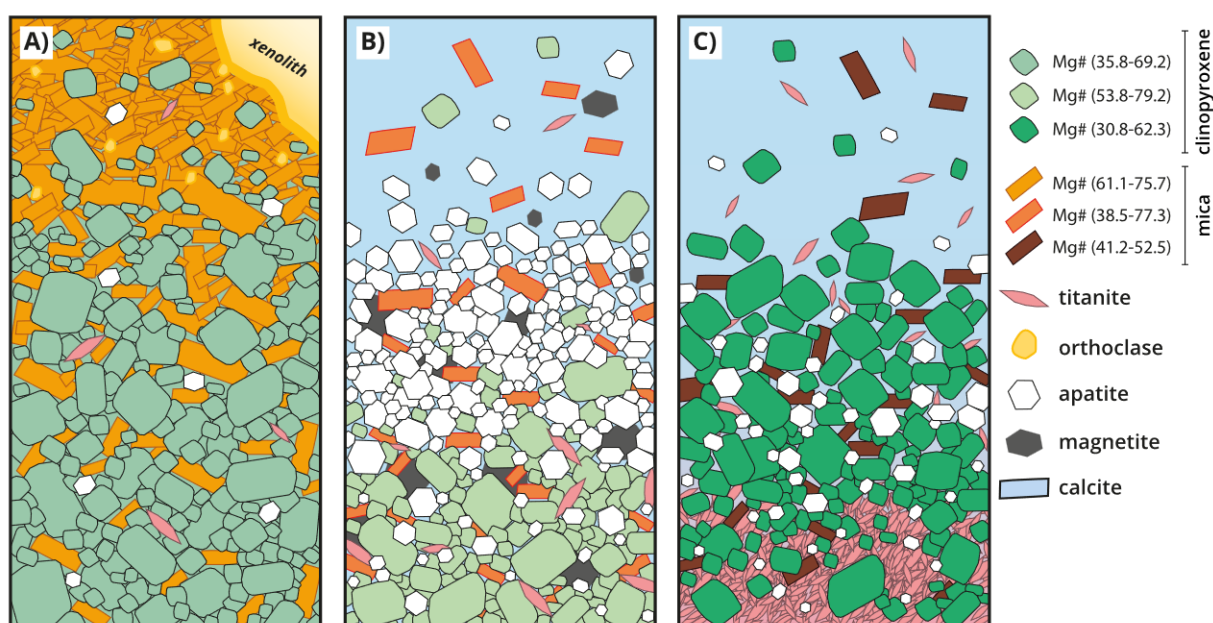


Fig. 3.19 Conceptual sketch of mineral textures of Catalão II rocks intrusive stages: **A)** Stage I – tetraferriphlogopite bebedourite; **B)** Stage II – apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and diopside calcite carbonatite; **C)** Stage III – titanite bebedourite and aegirine-augite calcite carbonatite. Mg# ($\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$) is indicated for clinopyroxene and mica.

3.10.3 APATITE CONCENTRATION IN THE COQUEIROS DEPOSIT

The Coqueiros phosphate deposit is estimated at 45 Mt at 11.8% P₂O₅ (CMOC, 2022) of oxide resources, developed over a 45 to 60 m thick regolith. Fresh rock resources are estimated at 408 Mt at 9.0% P₂O₅ due to important volumes of apatite and apatite-rich bebedourites. Major phosphate-rich lithologies comprise the tetraferriphlogopite apatite, apatite bebedourite, and titanite bebedourite in a less extent. In a broad sense, tetraferriphlogopite apatite could be considered a clinopyroxene-poor facies from a fractionated apatite bebedourite, considering the similar ranges from mineral and trace-element composition between both rock types. Other lithologies represented by tetraferriphlogopite bebedourite and clinopyroxene calcite carbonatites host accessory apatite, but are usually below 5.0 wt.% P₂O₅.

The apatite enrichment in Catalão II rocks is most likely to result from fractional crystallization. An extensive fractionation of silicate minerals like clinopyroxene, mica, and titanite is evidenced from the general compositional trends expressed to a progressive depletion in SiO₂, Al₂O₃, MgO, and TiO coupled with the enrichment in FeO/Fe₂O₃, CaO, P₂O₅, CO₂, as well as Na₂O and incompatible elements like REE and SrO to a lesser extent. The first intrusive stage with the formation of the tetraferriphlogopite bebedourite leads to an extensive crystallization of clinopyroxene and mica. Although some basement contamination may have contributed to higher SiO₂ and Al₂O₃ content, and to the more evolved mineral composition, from this point forward later magma batches probably were already enriched in P₂O₅. As a consequence, the following intrusive stages formed a continuous cumulative sequence composed of basal ultramafic cumulates, intermediate apatite-rich levels, and upper residual clinopyroxene calcite carbonatites.

The size of the Coqueiros oxide resource contrasts with much larger equivalents in Catalão I (966 Mt at 8.5 wt.% P₂O₅) and Tapira (1381 Mt at 8.19 wt.% P₂O₅; Ribeiro *et al.*, 2014), where up to 250 m thick regolith was developed over ultramafic rocks (*i.e.* dunites, wehrlites, bebedourites, and phlogopites), phoscorites, and carbonatites (Carvalho, 1974; Brod, 1999; Toledo *et al.*, 2004). Unlike Catalão II, where the complex has no clear geomorphological expression, Catalão I and Tapira developed silicified fenite rings and a flat dome-like structure that contributed to regolith development and its preservation from erosion.

Another possible factor for the development of a thinner regolith over Catalão II North is the predominance of tetraferriphlogopite over phlogopite. The result of mica weathering alteration is considered to form a regolith profile evolving through interstratified phlogopite-vermiculites, intermediate vermiculite, and final neoformed oxy-hydroxides. Previous studies suggest that tetraferriphlogopite could be susceptible to a more intense vermiculitization process evidenced by the predominance of phlogopite-annite composition in interstratified micaceous minerals (Azzone

and Ruberti, 2010). Therefore, the alteration of tetraferriphlogopite could lead to a more efficient formation of final smectitic products, oxide-hydroxides of Fe-Ti (*e.g.* hematite, goethite, and anatase), and quartz (Oliveira and Imbernon, 1998), meaning that tetraferriphlogopite-rich rocks could be more susceptible to weathering alteration.

3.11 CONCLUSIONS

The results of this study provide a comprehensive characterization of Catalão II ultramafic rocks and carbonatites that compose the Coqueiros phosphate deposit and provide important insights into the alkaline complex genesis:

- Given major modal variations and petrographical diversity, the bebedourite nomenclature is the most suitable to describe ultramafic cumulate rocks in Catalão II, as in the Alto Paranaíba complexes;
- Crosscutting relationships based on drill-core observations and petrographical from major components (*i.e.* clinopyroxene, mica, titanite, apatite, magnetite, and carbonate) make it possible to recognize three main intrusive stages in Catalão II North: 1 – tetraferriphlogopite bebedourite; 2 – apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and diopside calcite carbonatite; 3 – titanite bebedourite and aegirine-augite calcite carbonatite;
- Rare-earth element flat pattern normalized to the lamprophyre crosscutting the complex strongly suggests that Catalão II bebedourites and carbonatites are derived through ponding and crystal accumulation of a parental aillikite magma;
- Mineral composition trends are represented by a general enrichment in REE, Si and Sr in apatite, Fe³⁺ and Fe²⁺ in mica, Fe²⁺ and Na in clinopyroxene, and Sr in carbonates unveiling important information to the investigation of bebedourites and carbonatites magmatic evolution;
- Major whole-rock composition shows a depletion in MgO, SiO₂, and Al₂O₃, and an enrichment in CaO, P₂O₅, and CO₂. REE patterns show a fractionated feature from light relative to the heavy earth elements. Trace-element anomalies are present for Nb-Ta, Zr-Hf, Th, Sr, P, La-Ce, and Ti. General whole-rock composition indicates the fractionation of specific mineral phases such as titanite, calcite, and apatite.
- Tetraferriphlogopite bebedourite presents a more homogeneous apatite, mica, and carbonate composition, a Na enrichment in clinopyroxene, a distinctive trace-element pattern, relatively high Rb/Sr and low Gd/Lu ratio that suggests its formation from an early intrusive magma batch with a contribution of crustal contamination;
- Apatite bebedourite, tetraferriphlogopite apatite, and diopside calcite carbonatite present a continuous compositional trend from apatite, mica, clinopyroxene, and carbonate. Trace-

element variation also presents overlapping patterns that indicate a consanguineous evolution;

- Titanite bebedourite and aegirine-augite calcite carbonatite also present continuous mineral compositional trends and overlapping trace-element patterns, but they differ from previous units by the magnetite absence, higher Fe^{2+} -enriched mica, more Na-enriched clinopyroxene, and higher REE abundance, which indicate derivation from a slightly more evolved magma batch;
- Continuous mineral composition trends and the progression towards the enrichment of incompatible elements (REE-Sr), CaO, and volatiles, with a respective depletion in MgO, SiO_2 , and Al_2O_3 is a clear indicative of fractional crystallization between pairs of ultramafic cumulates and carbonatites;
- The resulting cumulatic sequence is formed by basal ultramafic cumulates which comprise the bebedourites, intermediate apatite-rich levels, and top residual clinopyroxene calcite carbonatites and, therefore, orthomagmatic apatite concentration is promoted by extensive removal of silicate minerals and the crystallization of cumulatic apatite levels.

Acknowledgments

This work was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. The authors thank Anglo-American Brazil Exploration Division and Matheus Palmieri for granting access to Catalão II drill cores that were sampled in earlier 2011, and CMOC Brazil for support and access to additional samples that made this research possible. The work was further supported by the Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) which provided the EPMA microprobe analyses. The University of Brasília is gratefully acknowledged for its support and access to laboratory facilities, and Professor Nilson Botelho for the assistance with additional microprobe analyses.

4.1 CONCLUSÕES

O complexo alcalino-carbonatítico de Catalão II foi uma das últimas intrusões carbonatíticas descobertas na Província ígnea do Alto Paranaíba que, apesar de sua menor área em volume proporcionalmente comparado aos outros grandes complexos (*i.e.* Catalão I, Tapira, Salitre I e Serra Negra), se destaca pela grande diversidade de rochas e pelas importantes mineralizações em nióbio e fosfato, além de outras potenciais *commodities* associadas como terras raras, cobre, titânio, magnetita e barita. Nesse contexto, dentre as principais contribuições do presente trabalho destaca-se a descrição completa dos principais tipos de rochas e, de forma complementar, uma extensa revisão de nomenclatura considerando os trabalhos anteriores na literatura e novas informações trazidas pelo avanço da pesquisa mineral no complexo.

A porção norte do complexo permaneceu como umas das localidades menos estudada e conhecida em trabalhos anteriores que, em muitos casos, compreenderam temas ligados à porção sul e sua mineralização em nióbio. O correspondente depósito Coqueiros na porção norte é formado por uma mineralização peculiar de fosfato em rocha fresca, tendo em vista o perfil dos depósitos econômicos de fosfato na região formados a partir de concentrações supergênicas de apatita e, dessa forma, possibilitando uma oportunidade única no entendimento dos processos que levam a concentração magmática desse mineral.

A partir de amostras provenientes de testemunhos de sondagem diamantada e baseado em dados petrográficos e químicos (*i.e.* composição mineral e rocha total), são reconhecidos pelo menos três estágios intrusivos de bebedouritos e dois deles associados com respectivos clinopiroxênio calcita carbonatitos. Como principal mecanismo de diferenciação magmática, a cristalização fracionada é evidenciada importante contribuição na formação de bebedouritos e carbonatitos a partir de um magma parental silicato-carbonatado, bem como na formação de níveis de apatititos mineralizados. Fatores como a relação de corte e textura, a presença de *trends* químicos de evolução entre os minerais principais e padrões de elementos-traço semelhantes entre os tipos litológicos são características distintivas que suportam essa hipótese.

No entanto, embora novas informações e hipóteses tenham sido acrescentadas, série de estudos futuros ainda são necessários para esclarecer aspectos da formação e composição do complexo Catalão II. Trabalhos futuros na área podem incluir aspectos como: a concentração supergênica de apatita; maior detalhamento dos fenitos; a formação de foscóritos e a relação entre variedades portadoras de olivina e variedades ricas em flogopita e pirocloro; bem como a formação de dolomita carbonatitos tardios e os mecanismos de concentração de elementos terras raras.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M., 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências* 13, 139-158.
- ALS, 2022. ALS Schedule of Services & Fees, Geochemistry. ALS Laboratories Ltd., p. 32.
- Anenburg, M., Broom-Fendley, S., Chen, W., 2021. Formation of rare earth deposits in carbonatites. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 17(5), pp. 327-332.
- Araújo, D.P. 1996. Metassomatismo no complexo carbonatítico Catalão I: Implicações para a composição do magma carbonatítico e para o metassomatismo carbonatítico no manto superior. Unpublished PhD Thesis, University of Brasília, Brazil.
- Araújo, A.L.N., Carlson, R.W., Gaspar, J.C., Bizzi, L.A., 2001. Petrology of kamafugites and kimberlites from the Alto Paranaíba Alkaline Province, Minas Gerais, Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 142, 163–177.
- Azzone, R.G., Ruberti, E., 2010. The compositional evolution of the phyllosilicates in the lateritic profile of the Catalão I Ultramafic Alkaline-carbonatitic Complex (GO). *Revista do Instituto de Geociências*, 10, pp. 23-43.
- Azzone, R.G., Munoz, P.M., Enrich, G.E.R., Alves, A., Ruberti, E., Gomes, C.B., 2016. Petrographic, geochemical and isotopic evidence of crustal assimilation processes in the Ponte Nova alkaline mafic-ultramafic massif, SE Brazil. *Lithos*, 260, pp.58-75.
- Barbosa, E.S.R., Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Dantas, E.L., 2012. Bebedourite from its type area (Salitre I complex): A key petrogenetic series in the Late-Cretaceous Alto Paranaíba kamafugite-carbonatite-phoscorite association, central Brazil. *Lithos*. 144, 56-72.
- Barbosa, E.S.R., Brod, J.A., Cordeiro, P.F.O., Junqueira-Brod, T.C., Santos, R.V., Dantas, E.L., 2020. Phoscorites of the Salitre I complex: Origin and petrogenetic implications. *Chemical Geology*, 535, pp. 119463.
- Bell K., Rukhlov A.S., 2004. Carbonatites from the Kola Alkaline Province: Origin, evolution and source characteristics. In: Wall F. and Zaitsev A.N. (Eds.) *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, pp. 421-455.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In *Developments in geochemistry*, 2, pp. 63-114.
- Brasil Government Report, 2021. Decreto nº 10.991, de 11 de março de 2022. Institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022–2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos, Brasília.
- Brassinnes, S., Balaganskaya, E., Demaiffe, D., 2005. Magmatic evolution of the differentiated ultramafic, alkaline and carbonatite intrusion of Vuoriyarvi (Kola Peninsula, Russia). A LA-ICP-MS study of apatite. *Lithos*, 85(1-4), pp. 76-92.
- Braunger, S., Marks, M.A.W., Walter, B.F., Neubauer, R., Reich, R., Wenzel, T., Parsapoor, A., Markl, G., 2018. The petrology of the Kaiserstuhl Volcanic Complex, SW Germany: The importance of metasomatized and oxidized lithospheric mantle for carbonatite generation. *Journal of Petrology*, 59(9), pp. 1731-1762.

- Brigatti, M.F., Medici, L., Saccani, E., Vaccaro, C., 1996. Crystal chemistry and petrologic significance of Fe³⁺-rich phlogopite from the Tapira carbonatite complex, Brazil. *American Mineralogist*, 81(7-8), pp. 913-927.
- Brigatti, M.F., Malferrari, D., Medici, L., Ottolini, L., Poppi, L., 2004. Crystal chemistry of apatites from the Tapira carbonatite complex, Brazil. *European Journal of Mineralogy*, 16(4), pp. 677-685.
- Brod, J.A., 1999. Petrology and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais State, Brazil. PhD Thesis, University of Durham, UK.
- Brod, J.A., Gibson, S.A., Thompson, R.N., Junqueira-Brod, T.C., Seer, H.J., Moraes, L.C., Boaventura, G.R., 2000. Kamafugite affinity of the Tapira alkaline-carbonatite complex (Minas Gerais, Brazil). *Revista Brasileira de Geociências*. 30, 404-408.
- Brod, J.A., Gaspar, J.C., De Araújo, D.P., Gibson, S.A., Thompson, R.N., Junqueira-Brod, T.C., 2001. Phlogopite and tetra-ferriphlogopite from Brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constraints and implications for mineral-chemistry systematics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(3), pp. 265-296.
- Brod, J.A., Gaspar, J.C., Diniz-Pinto, H.S., Junqueira-Brod, T.C., 2005. Spinel chemistry and petrogenetic processes in the Tapira alkaline-carbonatite complex, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(1), pp. 23-32.
- Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Gaspar, J.C., Petrinovic, I.A., Valente, S. de C., Corval, A., 2013. Decoupling of paired elements, crossover REE patterns, and mirrored spider diagrams: Fingerprinting liquid immiscibility in the Tapira alkaline-carbonatite complex, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 41, 41-56.
- Cabral Neto, I., Nannini, F., Silveira, F.V., Cunha, L.M., 2017. Áreas kimberlíticas e diamantíferas do estado de Minas Gerais e regiões adjacentes. CPRM, Brasília, Série Pedras Preciosas, n. 10, Programa Geologia do Brasil - Projeto Diamante Brasil.
- Carlson, R.W., Araujo, A.L.N., Junqueira-Brod, T.C., Gaspar, J.C., Brod, J.A., Petrinovic, I.A., Hollanda, M.H.B.M., Pimentel, M.M., Sichel, S., 2007. Chemical and isotopic relationships between peridotite xenoliths and mafic-ultrapotassic rocks from Southern Brazil. *Chemical Geology*, 242, 418-437.
- Carvalho, W.T., 1974. Aspectos geológicos e petrográficos do complexo ultramáfico-alcálico de Catalão I, GO. In: *Anais do 28º Congresso Brasileiro de Geologia*, vol. 5, Porto Alegre, Brasil. pp. 107-123.
- Chakhmouradian, A.R., Reguir, E.P., Zaitsev, A.N., Couëslan, C., Xu, C., Kynický, J., Mumin, A.H. and Yang, P., 2017. Apatite in carbonatitic rocks: Compositional variation, zoning, element partitioning and petrogenetic significance. *Lithos*, 274, pp.188-213.
- CMOC Group Limited, 2022. 2022 Annual Report, Resources and Reserves, pp. 44-46.
- Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., Marques, L.S., Censi, P., Ruberti, E., Antonini, P., 2005. Carbonatites from southeastern Brazil: geochemistry, O-C, Sr-Nd-Pb isotopes and relationships with the magmatism from the Paraná-Angola-Namibia Province. In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. (Eds.), *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*. EDUSP/FAPESP, São Paulo. 657-688.
- Conceição, F.T., Vasconcelos, P.M., Godoy, L.H., Navarro, G.R., 2020. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronological evidence for multiple magmatic events during the emplacement of Tapira alkaline-carbonatite complex, Minas Gerais, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 97, 102416.

- Conceição, F.T., Vasconcelos, P.M., Godoy, L.H., Navarro, G.R., Montibeller, C.C., Sardinha, D.S., 2022. Water/rock interactions, chemical weathering and erosion, and supergene enrichment in the Tapira and Catalão I alkaline-carbonatite complexes, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*. 237, 106999.
- Cordeiro, P.F.O., Brod, J.A., Dantas, E.L., Barbosa, E.S.R., 2010. Mineral chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil. *Lithos* 118, 223–237.
- Dawson, J.B., Smith, J.V., Steele, I.M., 1994. Trace-element distribution between coexisting perovskite, apatite, and titanite from Oldoinyo Lengai, Tanzania. *Chemical Geology*, 117(1-4), pp.285-290.
- Decrée, S., Cawthorn, G., Deloule, E., Mercadier, J., Frimmel, H., Baele, J.M., 2020. Unravelling the processes controlling apatite formation in the Phalaborwa Complex (South Africa) based on combined cathodoluminescence, LA-ICPMS and in-situ O and Sr isotope analyses. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175, pp. 1-31.
- Doroshkevich, A.G., Veksler, I.V., Klemm, R., Khromova, E.A., Izbrodin, I.A., 2017. Trace-element composition of minerals and rocks in the Belaya Zima carbonatite complex (Russia): Implications for the mechanisms of magma evolution and carbonatite formation. *Lithos*, 284, pp. 91-108.
- Eby, G.N., Lloyd, F.E., Woolley, A.R., 2009. Geochemistry and petrogenesis of the Fort Portal, Uganda, extrusive carbonatite. *Lithos*, 113(3-4), pp. 785-800.
- Fendley, S.B., Siegfried, P.R., Wall, F., O'Neill, M., Brooker, R.A., Fallon, E.K., Pickles, J.R., Banks, D.A., 2021. The origin and composition of carbonatite-derived carbonate-bearing fluorapatite deposits. *Mineralium Deposita*, 56, pp.863-884.
- Ferreira, A.C., Conceição, R.V., Mizusaki, A.M.P., 2022. Mesozoic to Cenozoic alkaline and tholeiitic magmatism related to West Gondwana break-up and dispersal. *Gondwana Research*. 106, 15-33.
- Fonseca, D.S., 2018. Fosfato. In: Dalla Costa, M.M., Medeiros, K. A., Lima, T.M., (Eds.), *Sumário Mineral Brasileiro*, Agência Nacional de Mineração, Brasília, pp. 117-119.
- Gaspar, J.C., Wyllie, P.J., 1987. The phlogopites from the Jacupiranga carbonatite intrusions. *Mineralogy and Petrology*, 36(2), pp. 121-134.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P., Mitchell, J.G., 1995. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. *Journal of Petrology*, 36(1), pp.189-229.
- Giebel, R.J., Marks, M.A., Gauert, C.D., Markl, G., 2019. A model for the formation of carbonatite-phoscorite assemblages based on the compositional variations of mica and apatite from the Palabora Carbonatite Complex, South Africa. *Lithos*, 324, pp. 89-104.
- Gittins, J., 1989. The origin and evolution of carbonatite magmas. In: Bell, K. (Ed.), *Carbonatites Genesis and Evolution*. Unwin-Hyman, London, pp. 580-600.
- Grasso C.B., 2010. Petrologia do complexo alcalino-carbonatítico de Serra Negra, MG. Unpublished M.Sc., Thesis, University of Brasília, Brazil, 156 pp.
- Guarino, V., Azzone, R.G., Brotzu, P., de Barros Gomes, C., Melluso, L., Morbidelli, L., Ruberti, E., Tassinari, C.C.G., Brilli, M., 2012. Magmatism and fenitization in the Cretaceous potassium-alkaline-carbonatitic complex of Ipanema São Paulo State, Brazil. *Mineralogy and Petrology*, 104, pp. 43-61.

- Guarino, V., Wu, F.-Y., Lustrino, M., Melluso, L., Brotzu, P., Gomes, C.B., Ruberti, E., Tassinari, C.C.G., Svisero, D.P., 2013. U-Pb ages, Sr-Nd isotope geochemistry, and petrogenesis of kimberlites, kamafugites and phlogopite-picrites of the Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil. *Chem. Geol.* 353, 65–82.
- Guarino, V., Wu, F.Y., Melluso, L., de Barros Gomes, C., Tassinari, C.C.G., Ruberti, E., Brilli, M., 2016. U-Pb ages, geochemistry, C–O–Nd–Sr–Hf isotopes and petrogenesis of the Catalão II carbonatitic complex (Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil): implications for regional-scale heterogeneities in the Brazilian carbonatite associations. *International Journal of Earth Sciences*. 106(6), 1963–1989.
- Gurenko, A.A., Sobolev, A.V., 2018. Can orthopyroxene be present in the source of Toro-Ankole, East African Rift, Kamafugites? *Journal of Petrology*, 59(8), pp. 1517–1550.
- Hammouda, T., Chantel, J., Devidal, J.L., 2010. Apatite solubility in carbonatitic liquids and trace element partitioning between apatite and carbonatite at high pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(24), pp. 7220–7235.
- Hirano, H., Kamitani, M., Sato, T., Sudo, S., 1990. Niobium mineralization of Catalao I carbonatite complex, Goias, Brazil. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, 41, pp. 577–594.
- Holtstam, D., Cámara, F., Skogby, H., Karlsson, A., Langhof, J., 2019. Description and recognition of potassic-richterite, an amphibole supergroup mineral from the Pajsberg ore field, Värmland, Sweden. *Mineralogy and Petrology*, 113, pp. 7–16.
- Issa Filho, A., Lima, P.R.A.S., Souza, O.M., 1984. Aspects of the geology of the Barreiro Carbonatite Complex, Araxa, MG, Brazil. *Carbonatitic complexes of Brazil: geology*, pp. 19–44.
- Klein, P.B.W., 2008. Geoquímica de rochas total, geocronologia de U-Pb e geologia isotópica de Sm-Nd das rochas ortognáissicas e unidades litológicas associadas da região de Ipameri-Catalão (GO). Ph.D. Unpublished Thesis, University of Brasília, Brazil.
- Klemme, S., Dalpé, C., 2003. Trace-element partitioning between apatite and carbonatite melt. *American Mineralogist*, 88(4), pp. 639–646.
- Kohn, M.J., 2017. Titanite petrochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83(1), pp. 419–441.
- Kontonikas-Charos, A., Ehrig, K., Cook, N.J., Ciobanu, C.L., 2019. Crystal chemistry of titanite from the Roxby Downs Granite, South Australia: insights into petrogenesis, subsolidus evolution and hydrothermal alteration. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174, pp.1–20.
- Krasnova, N.I., Petrov, T.G., Balaganskaya, E.G., Garcia, D., Moutte, D., Zaitsev, A.N., Wall, F., 2004a. Introduction to phoscorites: occurrence, composition, nomenclature and petrogenesis. In: Wall, F. and Zaitsev A.N. (Eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, pp. 45–79.
- Krasnova, N.I., Balaganskaya, E.G., Garcia, D., 2004b. Kovdor – classic phoscorites and carbonatites. In: Wall, F., Zaitsev A.N. (Eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, pp. 99–132.
- Lapin, A.V., 1979. Mineral parageneses of apatite ores and carbonatites of the Sebl'yavr Massif. *International Geology Review*, 21(9), pp.1043–1052.

- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., 2002. *Igneous rocks. A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Le Roex, A.P., Bell, D.R., Davis, P., 2003. Petrogenesis of group I kimberlites from Kimberley, South Africa: evidence from bulk-rock geochemistry. *Journal of Petrology*, 44(12), pp.2261-2286.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., 1997. Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist*, 35(1), pp. 219-246.
- Lee, W.J., Wyllie, P.J., 1998. Processes of crustal carbonatite formation by liquid immiscibility and differentiation, elucidated by model systems. *Journal of Petrology*, 39(11-12), pp. 2005-2013.
- Lee, M.J., Garcia, D., Moutte, J., Lee, J.I., 2003. Phlogopite and tetraferriphlogopite from phoscorite and carbonatite associations in the Sokli massif, Northern Finland. *Geosciences Journal*, 7(1), pp. 9-20.
- Machado Júnior, D.L., 1991. *Geologia e aspectos metalogenéticos do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão II (GO)*. Unpublished M.Sc., Thesis, State University of Campinas, Brazil, 95 pp.
- Melo, M.V.L.C., 1999. *Química dos minerais das rochas do Complexo Carbonatítico de Catalão II: Implicações Petrogenéticas*. Unpublished M.Sc., Thesis, University of Brasília, Brazil, 232 pp.
- Mitchell, R.H., 1995. Kimberlites and orangeites. *Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks*, pp. 1-90.
- Mitchell, R.H., 2015. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. *Ore Geology Reviews*, 64, pp. 626-641.
- Mitchell, R.H., Gittins, J., 2022. Carbonatites and carbothermalites: A revised classification. *Lithos*, 430, pp. 106861.
- Morbidelli, L., Gomes, C.B., Beccaluva, L., Brotzu, P., Conte, A.M., Ruberti, E., Traversa, G., 1995. Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite associations from Brazil. *Earth-Science Reviews*, 39(3-4), pp. 135-168.
- Morbidelli, L., Gomes, C.B., Beccaluva, L., Brotzu, P., Garbarino, C., Riffel, B.F., Ruberti, E., Traversa, G., 1997. Parental magma characterization of Salitre cumulate rocks (Alto Paranaíba Alkaline Province, Brazil) as inferred from mineralogical, petrographic, and geochemical data. *International Geology Review*. 39, 723–743.
- Morimoto, N., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39(1), 55-76.
- Oliveira, Í.L., Brod, J.A., Cordeiro, P.F., Dantas, E.L., Mancini, L.H., 2017. Insights into the late-stage differentiation processes of the Catalão I carbonatite complex in Brazil: New Sr-Nd and C-O isotopic data in minerals from niobium ores. *Lithos*, 274, pp. 214-224.
- Oliveira, S.M.B., Imbernon, R.A.L., 1998. Weathering alteration and related REE concentration in the Catalão I carbonatite complex, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(4), pp. 379-388.
- Oliveira, I.W.B., Sachs, L.L.B., Silva, V.A., Batista, I.H., 2004. Folha SE.23-Belo Horizonte, in: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J.H., Santos, J.O.S., Abram, M.B., Neto, R.L., Matos, G.M.M., Vidotti, R.M., Ramos, M.A.B., Jesus, J.D.A. (Eds.), *Carta geológica do Brasil ao millionésimo*:

- Palabora Mining Company Limited Mine Geological and Mineralogical Staff, 1976. The geology and the economic deposits of copper, iron, and vermiculite in the Palabora igneous complex; a brief review. *Economic Geology*, 71, pp. 177-192.
- Palmieri, M., Brod, J.A., Cordeiro, P., Gaspar, J.C., Barbosa, P.A.R., de Assis, L.C., Junqueira-Brod, T.C., Silva, S.E.E., Milanezi, B.P., Machado, S.A., Jácomo, M.H., 2022. The carbonatite-related Morro do Padre niobium deposit, Catalão II Complex, central Brazil. *Economic Geology*, 117(7), 1497-1520.
- Panina, L.I., Motorina, I.V., 2008. Liquid immiscibility in deep-seated magmas and the generation of carbonatite melts. *Geochemistry International*, 46, pp. 448-464.
- Pasero, M., Kampf, A.R., Ferraris, C., Pekov, I.V., Rakovan, J., White, T.J., 2010. Nomenclature of the apatite supergroup minerals. *European Journal of Mineralogy*, 22(2), pp.163-179.
- Pereira, V.P., 1995. A alteração no maciço alcalino-carbonatítico de Catalão I – Brasil: Evolução mineralógica. PhD Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.
- Petrov, S.V., 2004. Economic deposits associated with the alkaline and ultrabasic complexes of the Kola Peninsula. In: Wall, F. and Zaitsev A.N. (Eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, pp. 469-490.
- Pirajno, F. and Yu, H.C., 2022. The carbonatite story once more and associated REE mineral systems. *Gondwana Research*, 107, pp.281-295.
- Prokopyev, I.R., Doroshkevich, A.G., Zhumadilova, D.V., Starikova, A.E., Nugumanova, Y.N., Vladykin, N.V., 2021. Petrogenesis of Zr-Nb (REE) carbonatites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia): Mineralogy and inclusion data. *Ore Geology Reviews*, 131, pp. 104042.
- Pufahl, P.K., 2010, Bioelemental sediments, in James, N.P., and Dalrymple, R.W., eds., *Facies models*, 4th ed.: Geological Association of Canada, p. 477–503.
- Pufahl, P.K., Groat, L.A., 2016. Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: an invited paper. *Economic Geology*, 112(3), pp. 483-516.
- Ramos, G.S., 2021. Caracterização mineralógica do processo de beneficiamento do minério de nióbio da Mina Boa Vista, Catalão-GO. Unpublished M.Sc., Thesis, University of Brasília, Brazil.
- Reguir, E.P., Chakhmouradian, A.R., Halden, N.M., Malkovets, V.G., Yang, P., 2009. Major-and trace-element compositional variation of phlogopite from kimberlites and carbonatites as a petrogenetic indicator. *Lithos*, 112, pp. 372-384.
- Reguir, E.P., Chakhmouradian, A.R., Pisiak, L., Halden, N.M., Yang, P., Xu, C., Kynický, J., Couëslan, C.G., 2012. Trace-element composition and zoning in clinopyroxene-and amphibole-group minerals: implications for element partitioning and evolution of carbonatites. *Lithos*, 128, pp.27-45.
- Ribeiro, C.C., 2008. Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I. Unpublished PhD Thesis, University of Brasília, Brazil.

- Ribeiro, C.C., Brod, J.A., Junqueira-Brod, T.C., Gaspar, J.C., Palmieri, M., Cordeiro, P.F.O., Torres, M.G., Grasso, C.B., Barbosa, E.S.R., Barbosa, P.A.R., Ferrari, A.J.D., Gomide, C.S., 2014. Potencial e controles metalogenéticos de ETR, Ti e Nb em províncias alcalino-carbonatíticas brasileiras. In: Silva, M.D.G.D., Rocha Neto, M.B.D., Jost, H., Kuyumjian, R.M., (Eds.), *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*. Belo Horizonte, CPRM, pp. 559-589.
- Riccomini, C., Velázquez, V.F., Gomes, C.B., 2005. Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in central-southeastern Brazilian platform. In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. (Eds.), *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*. Edusp/Fapesp, São Paulo, 31–55.
- Rodrigues, C.S., Lima, P., 1984. Complexos carbonatíticos do Brasil, in CBMM ed., *Complexos Carbonatíticos do Brasil: Geologia*. São Paulo, CBMM, 1-15.
- Ruiz, F.V., Cordeiro, P., Reich, M., Motta, J.G., Ribeiro, C.C., Angerer, T., Bernardes, R.B., 2022. The genetic link between kamafugite magmatism and alkaline-carbonatite complexes in the Late Cretaceous Alto Paranaíba Igneous Province, Central Brazil. *International Geology Review*, pp. 1-23.
- Ruiz, F.V., Reich, M., Fendley, S.B., Beard, C.D., Barra, F., Romero, R., Cordeiro, P.F., 2024a. Origin of carbonatite-related niobium deposits: Insights from pyrochlore geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 366, 1-6.
- Ruiz, F.V., Reich, M., Cordeiro, P.F., Lagoeiro, L., Angerer, T., 2024b. Microanalytical investigation of K-rich fenites from the Catalão II alkaline-carbonatite complex in Central Brazil: Implications for ore-forming processes within the world's largest niobium province. *Journal of Geochemical Exploration*, p. 107420.
- Savko, K.A., Samsonov, A.V., Salnikova, E.B., Stifeeva, M.V., Kuznetsov, A.B., Kotov, A.B., Larionova, Y.O., Korish, E.H., Larionov, A.N., Chervyakovskaya, M.V. and Tsybulyaev, S.V., 2023. Paleoproterozoic alkaline-carbonatite magmatism in the convergent tectonic setting: Evidences from 2.07 Ga Dubravinsky complex in the Eastern Sarmatia. *Precambrian Research*, 395, p.107153.
- Schumacher, J.C., 1997. The estimation of the proportion of ferric iron in the electron-microprobe analysis of amphiboles. *Can. Mineral*, 35(1), pp. 238-246.
- Seer, H.J., Brod, J.A., Fuck, R.A., Pimentel, M.M., Boaventura, G.R., Dardenne, M.A., 2001. Grupo Araxá em sua área tipo: um fragmento de crosta oceânica neoproterozóica na Faixa de Dobramentos Brasília. *Revista Brasileira de Geociências*. 31(3), 385-396.
- Sgarbi, P.B.A., Gaspar, J.C., Valença, J.G., 2000. Clinopyroxene from Brazilian kamafugites. *Lithos*, 53(2), 101-116.
- Sgarbi, P.B.A., Heanman, L.M., Gaspar, J.C., 2004. U–Pb perovskite ages for Brazilian kamafugitic rocks: further support for a temporal link to a mantle plume hotspot track. *Journal of South American Earth Sciences* 16, 715–724.
- Sonoki, I.K., Garda, G.M., 1988. Idades K–Ar de rochas alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental: compilação e adaptação as novas constantes de decaimento. *Boletim IG-USP Série Científica* 19, 63–85.
- Stoppa, F., Cundari, A. 1995. A new italian carbonatite occurrence at Cupaello (Rieti) and its genetic significance. *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 122:275-288.

- Tappe, S., Foley, S.F., Jenner, G.A., Kjarsgaard, B.A., 2005. Integrating ultramafic lamprophyres into the IUGS classification of igneous rocks: rationale and implications. *Journal of Petrology*, 46(9), 1893-1900.
- Thompson, R.N., Morrison, M.A., Hendry, G.L., Parry, S.J., 1984. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 310(1514), pp. 549-590.
- Thompson, R.N., Gibson, S.A., Mitchell, J.G., Dickin, A.P., Leonardos, O.L., Brod, J.A., Greenwood, J.C., 1998. Migrating Cretaceous–Eocene magmatism in the Serra do Mar alkaline province, SE Brazil: melts from the deflected Trindade mantle plume? *Journal of Petrology*, 39, 1493–1526.
- Tischendorf, G., Rieder, M., Förster, H.J., Gottesmann, B., Guidotti, C.V., 2004. A new graphical presentation and subdivision of potassium micas. *Mineralogical Magazine*, 68(4), pp.649-667.
- Toledo, M.C.M.D., Pereira, V.P., 2001. A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. *Revista do Instituto Geológico*, 22(1/2), pp. 27-64.
- Toledo, M.C.M., Lenharo, S.L., Ferrari, V.C., Fontan, F., De Parseval, P., Leroy, G., 2004. The compositional evolution of apatite in the weathering profile of the Catalão I alkaline-carbonatitic complex, Goiás, Brazil. *The Canadian Mineralogist*, 42(4), pp. 1139-1158.
- Traversa, G., Gomes, C.B., Brotzu, P., Buraglini, N., Morbidelli, L., Principato, M.S., 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, pp. 71-98.
- Tröger, W.E., 1928. Alkaligesteine aus der Serra do Salitre im westlichen Minas Geraes, Brasilien. *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abteilung A*, pp. 202-204.
- U.S. Geological Survey, 2022, Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202 p.
- Vartiainen, H., 1980. The petrography, mineralogy and petrochemistry of the Sokli carbonatite massif, northern Finland. *Bulletin of Geological Survey of Finland*, 313, 126 pp.
- Vasyukova, O.V., Williams-Jones, A.E., 2022. Carbonatite metasomatism, the key to unlocking the carbonatite-phoscorite-ultramafic rock paradox. *Chemical Geology*, 602, p.120888.
- Veksler, I.V., Petibon, C., Jenner, G.A., Dorfman, A.M. and Dingwell, D.B., 1998. Trace element partitioning in immiscible silicate–carbonate liquid systems: an initial experimental study using a centrifuge autoclave. *Journal of Petrology*, 39(11-12), pp. 2095-2104.
- Wang, L.X., Marks, M.A., Wenzel, T., Von Der Handt, A., Keller, J., Teiber, H., Markl, G., 2014. Apatites from the Kaiserstuhl Volcanic Complex, Germany: new constraints on the relationship between carbonatite and associated silicate rocks. *European Journal of Mineralogy*, 26(3), pp.397-414.
- Warr, L.N., 2021. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3), pp.291-320.
- Woolley, A.R., Kjarsgaard, B.A., 2008. Paragenetic types of carbonatites as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database. *The Canadian Mineralogist*, 46(4), 741-752.
- Wu, F.Y., Mitchell, R.H., Li, Q.L., Zhang, C., Yang, Y.H., 2017. Emplacement age and isotopic composition of the Prairie Lake carbonatite complex, Northwestern Ontario, Canada. *Geological Magazine*, 154(2), pp. 217-236.

- Yaxley, G.M., Anenburg, M., Tappe, S., Decree, S., Guzmics, T., 2022. Carbonatites: classification, sources, evolution, and emplacement. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 50, pp. 261-293.
- Yegorov L.S., 1993. Phoscorites of the Maymecha-Kotuy ijolite-carbonatite association. *International Geology Review*, 35(4), 346-358.

LISTA DE APÊNDICES

Tabela A. Análises de apatita em Catalão II.

Tabela B. Análises de clinopiroxênio em Catalão II.

Tabela C. Análises de mica em Catalão II.

Tabela D. Análises de carbonatos em Catalão II.

Tabela E. Análises de magnetita em Catalão II.

Tabela F. Análises de ilmenita em Catalão II.

Tabela G. Análises de titanita em Catalão II.

Tabela H. Análises de anfibólio em Catalão II.

Tabela I. Composição química de elementos maiores para rochas de Catalão II.

Tabela J. Composição química de elementos-traço e terras raras para rochas de Catalão II.

Lista de abreviações usadas nas tabelas de apêndices

B1	Tetraferroflogopita bebedourito
B2a	Apatita bebedourito (fácies com alta proporção em clinopiroxênio)
B2b	Apatita bebedourito (fácies com alta proporção em apatita)
B3	Titanita bebedourito
FLAP	Tetraferroflogopita apatitito
C1a	Diopsídio calcita carbonatito (fácies com alta proporção em clinopiroxênio)
C1b	Diopsídio calcita carbonatito (fácies com baixa proporção em silicatos)
C2	Aegirina-augita calcita carbonatito
FEN	Fenito
c	Centro
b	Borda
n.a.	Óxido não analisado
-	Valor abaixo do limite de detecção

Tabela A. Análises de apatita em Catalão II.

Litho	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
Amostra	CQ-01	CQ-01	CPQ97-71.6	CPQ97-71.6	CPQ97-71.6	CTII4-444.6	CTII4-444.6	CTII4-444.6
Grão	ap-1	ap-2	ap-3	ap-4	ap-5	ap-6	ap-7	ap-8
SiO ₂	0.02	-	0.12	0.18	0.14	0.20	0.15	0.20
Al ₂ O ₃	0.00	-	-	0.01	-	-	0.01	-
FeO	0.10	0.06	0.06	0.02	0.04	0.03	0.15	0.07
MnO	-	-	0.03	0.02	-	0.05	-	-
MgO	-	-	0.028	0.02	0.04	-	0.01	0.01
CaO	56.06	56.24	52.50	52.63	53.09	54.00	54.31	53.38
SrO	1.20	1.11	0.55	0.78	0.65	0.37	0.50	0.70
Na ₂ O	0.12	0.08	0.19	0.24	0.26	0.23	0.17	0.18
K ₂ O	0.04	0.01	0.01	-	-	-	-	-
BaO	0.01	-	-	0.08	0.09	0.02	0.04	-
La ₂ O ₃	0.15	0.21	0.17	0.17	0.14	0.25	0.11	0.15
Ce ₂ O ₃	0.37	0.37	0.36	0.34	0.30	0.49	0.32	0.32
Nd ₂ O ₃	0.07	0.16	0.15	0.11	0.12	0.19	0.12	0.13
Y ₂ O ₃	-	-	-	-	0.03	0.01	-	0.01
P ₂ O ₅	41.48	40.74	41.21	41.65	39.97	40.88	42.18	42.19
F	4.31	3.65	4.41	4.46	4.36	5.08	5.37	5.35
Cl	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02
-O = (F,Cl) ₂	1.81	1.54	1.86	1.88	1.84	2.14	2.26	2.26
Total	102.11	101.11	97.93	98.83	97.38	99.68	101.16	100.45
Fórmula estrutural com base em 8 cátions								
P	2.912	2.877	3.023	3.031	2.940	2.953	3.007	3.034
Si	0.001	0.000	0.011	0.016	0.012	0.017	0.013	0.017
ΣT	2.913	2.877	3.034	3.046	2.952	2.971	3.019	3.052
Ca	4.980	5.027	4.874	4.846	4.942	4.937	4.899	4.859
Ba	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.001	0.001	0.000
Sr	0.058	0.054	0.027	0.039	0.033	0.019	0.024	0.035
Fe	0.007	0.004	0.004	0.002	0.003	0.002	0.010	0.005
Mn	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.004	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.004	0.003	0.005	0.000	0.001	0.001
Na	0.010	0.007	0.016	0.020	0.022	0.019	0.014	0.015
K	0.009	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
La	0.003	0.004	0.004	0.004	0.003	0.005	0.002	0.003
Ce	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.010	0.006	0.007
Nd	0.001	0.003	0.003	0.002	0.002	0.004	0.002	0.003
Y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
ΣM	5.075	5.110	4.945	4.927	5.019	5.000	4.961	4.927
F	1.129	0.963	1.209	1.212	1.198	1.371	1.428	1.439
Cl	0.000	0.001	0.002	0.002	0.000	0.002	0.001	0.002
OH	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Litho	B1	B2a	B2b	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP
Amostra	MP-RM15-213.7	CQ-04	CQ-08	CQ49	CQ49	CQ49	CQ49	CTII4-293.9
Grão	ap-9	ap-10	ap-11	ap-12	ap-13	ap-14	ap-15	ap-16
SiO ₂	0.32	0.11	-	0.03	0.06	0.03	0.01	-
Al ₂ O ₃	0.03	0.01	0.01	-	-	-	-	-
FeO	0.05	0.01	-	-	0.03	0.04	-	0.02
MnO	0.06	0.01	0.01	-	0.02	-	0.00	-
MgO	-	-	-	0.07	0.11	0.11	0.07	0.03
CaO	51.86	56.27	54.19	54.60	54.74	54.76	55.37	53.28
SrO	0.45	0.62	0.28	0.28	0.25	0.35	0.27	1.17
Na ₂ O	0.11	0.13	-	0.15	0.14	0.15	0.21	0.26
K ₂ O	0.01	-	-	0.01	0.01	-	-	0.01
BaO	-	-	-	0.13	0.01	0.11	0.08	0.01
La ₂ O ₃	0.19	0.21	0.02	0.04	0.07	0.05	0.05	0.14
Ce ₂ O ₃	0.41	0.48	0.25	0.13	0.13	0.14	0.17	0.27
Nd ₂ O ₃	0.16	0.14	0.14	0.06	0.04	0.04	0.04	0.12
Y ₂ O ₃	-	-	-	-	0.01	0.01	-	0.04
P ₂ O ₅	41.18	41.56	42.54	40.47	41.59	41.20	42.49	41.23
F	6.37	2.46	2.15	4.46	3.74	4.87	4.46	3.55
Cl	-	0.00	-	-	0.01	0.01	-	0.00
-O = (F,Cl) ₂	2.68	1.04	0.91	1.88	1.58	2.05	1.88	1.49
Total	98.52	100.96	98.69	98.56	99.36	99.83	101.33	98.63
Fórmula estrutural com base em 8 cátions								
P	3.043	2.916	3.052	2.932	2.976	2.956	2.995	2.988
Si	0.028	0.009	0.000	0.003	0.005	0.002	0.001	0.000
ΣT	3.072	2.925	3.052	2.934	2.981	2.958	2.996	2.988
Ca	4.851	4.997	4.920	5.006	4.958	4.972	4.938	4.887
Ba	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.004	0.002	0.000
Sr	0.023	0.030	0.014	0.014	0.012	0.017	0.013	0.058
Fe	0.004	0.001	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000	0.001
Mn	0.005	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.009	0.013	0.014	0.008	0.004
Na	0.009	0.011	0.000	0.013	0.012	0.012	0.017	0.021
K	0.003	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.002
La	0.004	0.004	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003
Ce	0.009	0.010	0.005	0.003	0.003	0.003	0.004	0.006
Nd	0.003	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
Y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
ΣM	4.910	5.055	4.943	5.051	5.006	5.027	4.985	4.984
F	1.760	0.646	0.576	1.208	1.000	1.306	1.174	0.960
Cl	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001
OH	0.000	0.354	0.424	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039

Litho	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	C2a	C2a	C2a	C2a
Amostra	CTII4-293.9	CTII4-293.9	CTII4-293.9	CTII4-293.9	CQ-58	CQ-59	CQ97-139.2	CQ97-139.2
Grão	ap-17	ap-18	ap-19	ap-20	ap-21	ap-22	ap-23	ap-24
SiO ₂	0.03	0.04	0.09	0.14	-	0.31	0.21	0.33
Al ₂ O ₃	-	-	0.02	0.02	-	0.01	-	-
FeO	0.01	-	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.07
MnO	0.02	0.07	-	0.01	-	0.02	0.02	0.11
MgO	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	-	0.00	0.00
CaO	52.71	53.53	53.10	53.78	56.48	56.02	54.75	53.62
SrO	0.91	0.95	0.62	0.55	0.74	0.77	0.41	0.45
Na ₂ O	0.20	0.21	0.30	0.23	0.10	0.17	0.19	0.18
K ₂ O	0.00	-	0.01	0.01	0.00	-	0.01	-
BaO	0.01	-	0.09	0.10	-	-	0.11	0.01
La ₂ O ₃	0.17	0.12	0.27	0.24	0.20	0.27	0.15	0.28
Ce ₂ O ₃	0.28	0.28	0.53	0.43	0.38	0.44	0.42	0.42
Nd ₂ O ₃	0.09	0.12	0.20	0.16	0.08	0.07	0.14	0.16
Y ₂ O ₃	0.01	0.05	-	0.03	-	-	0.03	-
P ₂ O ₅	41.00	40.75	41.11	42.09	41.17	40.95	40.33	40.05
F	4.07	3.54	5.00	5.41	3.21	2.48	4.47	4.67
Cl	-	0.00	-	0.01	0.01	0.01	0.02	-
-O = (F,Cl) ₂	1.71	1.49	2.10	2.28	1.35	1.05	1.89	1.97
Total	97.81	98.18	99.32	100.98	101.09	100.52	99.41	98.38
Fórmula estrutural com base em 8 cátions								
P	3.006	2.962	2.985	3.013	2.896	2.885	2.906	2.924
Si	0.002	0.003	0.008	0.012	0.000	0.026	0.018	0.028
ΣT	3.008	2.965	2.993	3.024	2.896	2.911	2.924	2.952
Ca	4.891	4.926	4.880	4.872	5.028	4.995	4.993	4.954
Ba	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.004	0.000
Sr	0.046	0.047	0.031	0.027	0.036	0.037	0.020	0.023
Fe	0.001	0.000	0.004	0.004	0.004	0.003	0.002	0.005
Mn	0.001	0.005	0.000	0.001	0.000	0.002	0.002	0.008
Mg	0.001	0.004	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.017	0.017	0.025	0.019	0.008	0.014	0.015	0.015
K	0.000	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000
La	0.004	0.003	0.006	0.005	0.004	0.006	0.003	0.006
Ce	0.006	0.006	0.011	0.009	0.008	0.009	0.009	0.009
Nd	0.002	0.002	0.004	0.003	0.002	0.001	0.003	0.003
Y	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
ΣM	4.969	5.010	4.970	4.946	5.089	5.066	5.053	5.024
F	1.113	0.961	1.356	1.446	0.844	0.653	1.204	1.274
Cl	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.000
OH	0.000	0.039	0.000	0.000	0.155	0.346	0.000	0.000

Líthio	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b
Amostra	CQ-62	CQ-62	CQ-62	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1
Grão	ap-25	ap-26	ap-27	ap-28	ap-29	ap-30	ap-31	ap-32
SiO ₂	0.09	0.06	0.26	0.13	0.31	0.11	0.09	0.08
Al ₂ O ₃	-	0.02	-	-	-	0.01	-	-
FeO	-	0.06	0.11	0.06	0.07	0.02	-	0.03
MnO	0.02	0.03	0.02	0.10	-	0.05	-	0.02
MgO	-	-	0.01	-	0.02	0.01	0.02	-
CaO	56.37	56.23	55.98	54.45	53.50	53.89	53.27	53.98
SrO	0.84	0.68	0.91	0.62	0.46	0.53	0.49	0.50
Na ₂ O	0.02	0.10	0.14	0.20	0.18	0.23	0.26	0.22
K ₂ O	-	-	0.05	0.01	-	0.02	-	0.03
BaO	-	0.00	-	0.02	-	0.01	-	0.03
La ₂ O ₃	0.11	0.22	0.24	0.11	0.18	0.11	0.21	0.14
Ce ₂ O ₃	0.36	0.50	0.49	0.25	0.39	0.31	0.36	0.31
Nd ₂ O ₃	0.00	0.03	0.24	0.08	0.15	0.12	0.12	0.14
Y ₂ O ₃	-	-	-	-	0.01	-	0.07	-
P ₂ O ₅	41.71	40.90	40.41	41.97	38.55	40.28	38.66	41.39
F	2.36	2.66	2.59	4.44	4.80	4.39	5.12	5.23
Cl	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01
-O = (F,Cl) ₂	1.00	1.12	1.09	1.87	2.02	1.85	2.16	2.20
Total	100.89	100.38	100.37	100.57	96.61	98.25	96.51	99.90
Fórmula estrutural com base em 8 cátions								
P	2.927	2.889	2.857	2.990	2.862	2.933	2.878	2.983
Si	0.007	0.005	0.022	0.011	0.027	0.010	0.008	0.007
ΣT	2.934	2.894	2.879	3.001	2.889	2.943	2.886	2.990
Ca	5.007	5.027	5.008	4.909	5.027	4.966	5.018	4.923
Ba	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Sr	0.040	0.033	0.044	0.030	0.023	0.026	0.025	0.025
Fe	0.000	0.004	0.008	0.004	0.005	0.001	0.000	0.002
Mn	0.002	0.002	0.002	0.007	0.000	0.004	0.000	0.002
Mg	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.001	0.002	0.000
Na	0.001	0.008	0.011	0.016	0.015	0.020	0.022	0.018
K	0.000	0.000	0.011	0.002	0.000	0.004	0.000	0.006
La	0.002	0.005	0.005	0.002	0.004	0.002	0.005	0.003
Ce	0.007	0.010	0.010	0.005	0.008	0.006	0.008	0.006
Nd	0.000	0.001	0.005	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003
Y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
ΣM	5.060	5.089	5.105	4.979	5.088	5.034	5.082	4.988
F	0.619	0.702	0.683	1.183	1.330	1.193	1.424	1.407
Cl	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.001	0.001
OH	0.380	0.297	0.316	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

[illegible]

Litho	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Amostra	CTII4-184.9	CTII4-413.1	CTII4-413.1	CTII4-413.1	CTII4-413.1	CTII4-413.1
Grão	ap-49	ap-50	ap-51	ap-52	ap-53	ap-54
SiO ₂	0.32	0.19	0.22	0.37	0.21	0.46
Al ₂ O ₃	0.02	0.00	-	0.01	-	0.00
FeO	0.00	0.06	0.05	0.06	0.08	0.14
MnO	0.03	-	0.14	0.11	-	0.05
MgO	-	0.01	0.00	0.02	-	0.01
CaO	53.89	54.54	54.34	54.63	53.84	53.46
SrO	0.44	0.39	0.54	0.39	0.55	0.40
Na ₂ O	0.17	0.08	0.16	0.24	0.12	0.25
K ₂ O	-	0.00	-	0.00	-	-
BaO	0.07	-	-	-	0.08	0.05
La ₂ O ₃	0.18	0.17	0.14	0.20	0.22	0.28
Ce ₂ O ₃	0.46	0.31	0.41	0.49	0.43	0.60
Nd ₂ O ₃	0.16	0.11	0.12	0.20	0.15	0.22
Y ₂ O ₃	0.01	0.07	-	-	-	-
P ₂ O ₅	39.63	41.51	41.62	40.68	40.12	38.53
F	6.31	5.02	5.62	4.50	5.70	5.10
Cl	0.02	-	0.01	0.02	-	0.00
-O = (F,Cl) ₂	2.66	2.11	2.37	1.90	2.40	2.15
Total	99.04	100.35	101.00	100.01	99.09	97.41
Fórmula estrutural com base em 8 cátions						
P	2.900	2.976	2.976	2.914	2.928	2.847
Si	0.027	0.016	0.018	0.032	0.018	0.040
ΣT	2.927	2.992	2.995	2.946	2.947	2.887
Ca	4.990	4.948	4.918	4.953	4.973	4.999
Ba	0.002	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002
Sr	0.022	0.019	0.026	0.019	0.027	0.020
Fe	0.000	0.004	0.003	0.004	0.006	0.010
Mn	0.002	0.000	0.010	0.008	0.000	0.004
Mg	0.000	0.001	0.001	0.003	0.000	0.001
Na	0.015	0.007	0.013	0.020	0.010	0.021
K	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
La	0.004	0.003	0.003	0.004	0.005	0.006
Ce	0.010	0.006	0.008	0.010	0.009	0.013
Nd	0.003	0.002	0.002	0.004	0.003	0.005
Y	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
ΣM	5.047	4.992	4.985	5.025	5.035	5.080
F	1.725	1.343	1.502	1.203	1.555	1.407
Cl	0.002	0.000	0.002	0.003	0.000	0.001
OH	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela B. Análises de clinopiroxênio em Catalão II.

Unidade	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
Amostra	CQ-01	CQ-01	CQ-01	CQ-01	CQ-01	CQ-01	CQ-02	CQ-02
Grão	cpx-1	cpx-1	cpx-2	cpx-2	cpx-3	cpx-3	cpx-4	cpx-4
Posição	b	c	c	b	c	b	c	b
SiO ₂	54.33	54.04	54.07	54.31	54.04	54.17	53.35	54.23
TiO ₂	0.02	0.01	0.03	0.06	0.03	0.04	0.07	0.08
Al ₂ O ₃	0.12	0.08	0.11	0.07	0.08	0.03	0.05	0.03
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	-	0.01
FeO	5.79	4.98	5.52	4.85	5.43	5.05	3.07	3.19
Fe ₂ O ₃	4.34	3.90	4.99	4.44	4.43	3.33	4.68	4.00
MnO	0.28	0.19	0.31	0.24	0.27	0.23	0.16	0.22
NiO	0.00	-	-	-	-	-	0.02	-
MgO	12.90	13.51	12.68	13.57	12.87	13.74	14.40	15.31
CaO	22.53	23.09	21.91	22.64	22.30	23.17	23.36	23.85
Na ₂ O	1.51	1.24	1.75	1.45	1.60	1.15	1.08	0.79
K ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.00	-	0.00	0.00	-
Total	101.84	101.07	101.39	101.63	101.06	100.91	100.25	101.69
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.991	1.988	1.991	1.987	1.993	1.993	1.971	1.970
Ti	0.005	0.004	0.005	0.003	0.003	0.001	0.002	0.001
Fe ³⁺	0.004	0.008	0.005	0.010	0.003	0.005	0.027	0.029
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002
Cr	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	-	0.000
Fe ³⁺	0.116	0.100	0.133	0.112	0.120	0.087	0.103	0.081
Mg	0.705	0.741	0.696	0.740	0.708	0.754	0.793	0.830
Ni	0.000	-	-	-	-	-	0.000	-
Fe ²⁺	0.178	0.153	0.170	0.146	0.167	0.155	0.095	0.088
Mn	0.001	0.005	-	-	0.004	0.003	0.005	-
ΣM1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000
Ca	0.884	0.910	0.864	0.887	0.881	0.914	0.925	0.929
Na	0.107	0.089	0.125	0.103	0.115	0.082	0.077	0.055
K	0.001	0.000	0.001	0.000	-	0.000	0.000	-
Fe ²⁺	-	-	0.000	0.002	-	-	-	0.009
Mn	0.008	0.001	0.010	0.007	0.004	0.004	-	0.007
ΣM2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002	1.000
Di	10.7	9.0	12.5	10.3	11.5	8.2	8.0	5.6
Hd	70.6	74.9	69.5	74.1	70.9	75.5	81.7	83.9
Aeg	18.6	16.1	18.0	15.6	17.6	16.3	10.3	10.5

Unidade	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
Amostra	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CPQ97-71.6	CPQ97-71.6
Grão	cpx-5	cpx-5	cpx-6	cpx-6	cpx-7	cpx-7	cpx-8	cpx-8
Posição	c	b	-	-	b	c	c	b
SiO ₂	53.94	53.90	53.70	54.01	54.09	54.39	53.02	53.47
TiO ₂	0.05	0.09	0.07	0.06	0.08	0.05	0.11	0.04
Al ₂ O ₃	0.04	0.03	0.09	0.10	0.03	0.00	0.14	0.18
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.06	0.30
FeO	3.72	2.64	5.36	4.09	3.04	2.09	7.33	4.74
Fe ₂ O ₃	3.82	4.06	4.21	3.82	3.82	5.37	1.56	3.19
MnO	0.18	0.18	0.19	0.22	0.18	0.19	0.19	0.31
NiO	0.02	0.00	0.03	-	0.02	0.00	-	-
MgO	14.71	15.05	13.40	14.36	14.99	14.45	13.75	14.18
CaO	23.66	24.07	22.61	23.29	24.05	23.10	20.77	21.92
Na ₂ O	0.88	0.87	1.26	1.05	0.85	1.60	2.29	1.53
K ₂ O	0.01	-	-	0.01	-	-	0.01	0.01
Total	101.02	100.89	100.91	101.02	101.16	101.25	99.22	99.86
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.976	1.972	1.983	1.981	1.975	1.982	1.973	1.980
Ti	0.002	0.001	0.004	0.004	0.001	0.000	0.006	0.008
Fe ³⁺	0.022	0.027	0.013	0.015	0.024	0.018	0.021	0.013
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.003	0.001
Cr	-	-	-	0.000	0.000	0.000	0.002	0.009
Fe ³⁺	0.084	0.085	0.104	0.091	0.081	0.129	0.185	0.120
Mg	0.803	0.821	0.738	0.785	0.816	0.785	0.763	0.783
Ni	0.001	0.000	0.001	-	0.001	0.000	-	-
Fe ²⁺	0.111	0.081	0.156	0.123	0.093	0.064	0.048	0.088
Mn	-	0.005	-	-	0.006	0.006	-	-
ΣM1	1.000	0.994	1.000	1.000	0.999	0.985	1.000	1.000
Ca	0.929	0.944	0.894	0.915	0.941	0.902	0.828	0.870
Na	0.062	0.062	0.090	0.075	0.060	0.113	0.165	0.110
K	0.001	-	-	0.000	-	-	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.003	-	0.010	0.003	-	-	0.000	0.011
Mn	0.005	-	0.006	0.007	-	-	0.006	0.010
ΣM2	1.000	1.006	1.000	1.000	1.001	1.015	1.000	1.000
Di	6.3	6.4	9.0	7.5	6.2	11.7	16.8	11.0
Hd	81.5	84.7	73.8	79.1	83.7	81.1	77.6	78.2
Aeg	12.1	8.9	17.1	13.3	10.1	7.2	5.5	10.8

Unidade	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
Amostra	CPQ97-71.6	CPQ97-71.6	CPQ97-71.6	CPQ97-71.6	CTH4-444.6	CTH4-444.6	CTH4-444.6	CTH4-444.6
Grão	cpx-9	cpx-9	cpx-10	cpx-10	cpx-11	cpx-11	cpx-12	cpx-12
Posição	c	b	c	b	c	b	c	b
SiO ₂	53.75	53.09	53.03	52.93	51.10	51.20	52.91	53.27
TiO ₂	0.07	0.22	-	0.11	0.20	0.40	0.22	0.15
Al ₂ O ₃	0.31	0.13	0.33	0.19	0.07	0.18	0.15	0.17
Cr ₂ O ₃	0.01	0.09	0.13	0.20	0.04	0.08	-	-
FeO	5.64	4.67	6.01	4.98	10.61	10.84	12.21	12.17
Fe ₂ O ₃	3.19	3.47	3.04	2.82	2.38	3.71	3.54	3.53
MnO	0.44	0.20	0.32	0.25	0.39	0.31	0.27	0.22
NiO	0.04	-	0.05	0.03	-	0.00	0.07	-
MgO	13.47	13.76	13.21	14.02	10.54	9.48	9.03	9.27
CaO	20.77	21.55	20.25	21.93	18.27	17.28	15.87	16.51
Na ₂ O	2.15	1.70	2.27	1.55	3.52	4.00	5.00	4.83
K ₂ O	0.02	-	-	0.01	-	-	-	-
Total	99.86	98.87	98.64	99.01	97.10	97.47	99.25	100.10
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.990	1.985	1.988	1.976	1.970	1.975	2.000	1.996
Ti	0.010	0.006	0.012	0.008	0.003	0.008	0.000	0.004
Fe ³⁺	-	0.009	-	0.016	0.027	0.017	-	-
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	0.004	-	0.003	-	-	-	0.006	0.004
Ti	0.002	0.006	-	0.003	0.006	0.012	0.006	0.004
Cr	0.000	0.003	0.004	0.006	0.001	0.002	-	-
Fe ³⁺	0.157	0.123	0.170	0.124	0.281	0.298	0.347	0.343
Mg	0.744	0.767	0.739	0.780	0.606	0.545	0.509	0.518
Ni	0.001	-	0.002	0.001	-	0.000	0.002	-
Fe ²⁺	0.092	0.102	0.084	0.086	0.077	0.120	0.112	0.111
Mn	-	-	-	-	0.013	0.010	0.009	0.007
ΣM1	1.000	1.000	1.000	1.000	0.983	0.987	0.991	0.986
Ca	0.824	0.863	0.813	0.877	0.755	0.714	0.643	0.663
Na	0.154	0.123	0.165	0.112	0.263	0.299	0.366	0.351
K	0.001	-	-	0.000	-	-	-	-
Fe ²⁺	0.007	0.007	0.012	0.002	-	-	-	-
Mn	0.014	0.006	0.010	0.008	-	-	-	-
ΣM2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.017	1.013	1.009	1.014
Di	15.3	12.2	16.3	11.4	27.4	30.7	36.8	35.6
Hd	73.6	76.3	73.2	78.9	63.3	56.0	51.1	52.5
Aeg	11.1	11.4	10.5	9.7	9.3	13.4	12.1	11.9

Unidade	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2a	B2a
Amostra	CTII4-444.6	CTII4-444.6	MP-RM15-213.7	MP-RM15-213.7	MP-RM15-213.7	MP-RM15-213.7	CQ-04	CQ-04
Grão	cpx-13	cpx-13	cpx-14	cpx-15	cpx-16	cpx-16	cpx-17	cpx-17
Posição	c	b	-	-	-	-	c	b
SiO ₂	52.40	53.27	52.23	52.55	51.75	51.61	54.32	52.59
TiO ₂	-	0.07	0.10	-	0.12	0.11	0.21	0.96
Al ₂ O ₃	0.09	0.12	-	0.02	0.05	0.05	0.04	0.37
Cr ₂ O ₃	0.04	-	-	0.06	-	-	0.01	-
FeO	11.27	9.69	5.26	6.74	8.14	9.31	3.15	5.37
Fe ₂ O ₃	2.39	3.32	2.58	5.22	3.80	3.19	3.78	3.47
MnO	0.44	0.22	0.51	0.70	0.65	0.59	0.10	0.18
NiO	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.15	0.02	-
MgO	10.72	10.84	13.89	10.77	10.36	10.40	14.57	13.42
CaO	19.09	18.15	22.56	19.64	19.47	18.66	23.88	24.67
Na ₂ O	3.50	3.79	1.25	2.71	3.04	3.32	1.13	0.57
K ₂ O	-	0.02	-	0.00	-	0.02	0.02	-
Total	99.95	99.49	98.38	98.41	97.37	97.40	101.22	101.60
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.966	1.997	1.968	2.002	1.991	1.985	1.982	1.938
Ti	0.004	0.003	-	-	0.002	0.002	0.002	0.016
Fe ³⁺	0.030	-	0.032	-	0.007	0.012	0.017	0.046
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.002	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	0.002	-	0.001	-	-	-	-
Ti	-	0.002	0.003	-	0.003	0.003	0.006	0.027
Cr	0.001	-	-	0.002	-	-	0.000	-
Fe ³⁺	0.288	0.273	0.117	0.193	0.229	0.257	0.087	0.050
Mg	0.599	0.606	0.780	0.612	0.594	0.596	0.793	0.737
Ni	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.005	0.000	-
Fe ²⁺	0.075	0.104	0.081	0.166	0.122	0.103	0.096	0.166
Mn	0.014	0.007	0.016	0.023	0.021	0.019	0.003	0.006
ΣM1	0.978	0.994	0.998	0.997	0.970	0.983	0.985	0.985
Ca	0.767	0.729	0.911	0.801	0.803	0.769	0.934	0.974
Na	0.255	0.276	0.091	0.200	0.227	0.248	0.080	0.041
K	-	0.001	-	0.000	-	0.001	0.001	-
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-
ΣM2	1.022	1.006	1.002	1.001	1.030	1.017	1.015	1.015
Di	27.0	27.8	9.4	20.0	23.5	25.6	8.2	4.3
Hd	63.5	61.0	80.5	61.1	61.6	61.7	81.6	77.7
Aeg	9.4	11.2	10.1	18.9	14.9	12.6	10.2	18.0

Unidade	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a
Amostra	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-05	CQ-05	CQ-05	CQ-05
Grão	cpx-18	cpx-18	cpx-19	cpx-19	cpx-20	cpx-21	cpx-22	cpx-23
Posição	c	b	c	b	b	c	b	c
SiO ₂	52.31	53.02	53.10	53.07	54.59	54.72	54.38	54.39
TiO ₂	1.10	1.11	1.03	1.13	0.23	0.28	0.26	0.29
Al ₂ O ₃	0.19	0.15	0.10	0.08	-	0.00	0.01	0.01
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	-	-	-	0.00	-
FeO	4.45	4.92	2.41	3.22	2.73	3.15	2.56	2.18
Fe ₂ O ₃	3.20	2.10	3.27	2.38	2.20	2.32	2.76	3.11
MnO	0.16	0.16	0.11	0.10	0.15	0.16	0.15	0.13
NiO	0.00	0.01	0.01	-	-	0.01	-	-
MgO	13.97	14.10	15.51	15.21	16.44	16.37	16.48	16.55
CaO	24.83	25.16	25.18	25.24	24.97	24.58	24.56	24.61
Na ₂ O	0.48	0.42	0.43	0.36	0.27	0.36	0.37	0.42
K ₂ O	-	0.00	-	0.02	0.02	-	-	0.01
Total	100.69	101.16	101.15	100.81	101.61	101.95	101.52	101.70
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.938	1.952	1.940	1.947	1.974	1.974	1.968	1.965
Ti	0.008	0.007	0.004	0.003	-	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.054	0.042	0.056	0.049	0.026	0.026	0.032	0.035
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.031	0.031	0.028	0.031	0.006	0.007	0.007	0.008
Cr	0.000	0.000	0.000	-	-	-	0.000	-
Fe ³⁺	0.035	0.016	0.034	0.016	0.034	0.037	0.044	0.049
Mg	0.771	0.774	0.845	0.832	0.886	0.880	0.889	0.891
Ni	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	-	-
Fe ²⁺	0.138	0.151	0.074	0.099	0.074	0.075	0.060	0.052
Mn	0.005	0.005	0.003	0.003	-	-	-	-
ΣM1	0.980	0.978	0.984	0.982	1.000	1.000	1.000	1.000
Ca	0.986	0.992	0.986	0.992	0.967	0.950	0.952	0.952
Na	0.034	0.030	0.030	0.025	0.019	0.025	0.026	0.029
K	-	0.000	-	0.001	0.001	-	-	0.001
Fe ²⁺	-	-	-	-	0.009	0.020	0.017	0.014
Mn	-	-	-	-	0.004	0.005	0.005	0.004
ΣM2	1.020	1.022	1.016	1.018	1.000	1.000	1.000	1.000
Di	3.6	3.1	3.2	2.6	1.9	2.5	2.6	2.9
Hd	81.3	80.6	88.7	86.8	89.3	87.6	89.2	90.0
Aeg	15.0	16.3	8.1	10.6	8.8	9.9	8.2	7.1

Unidade	B2a	B2b	B2b	B2b	B2b	B2b	B2b	B2b
Amostra	CQ-05	CQ-08	CQ-08	CQ-08	CQ-08	CQ-08	CQ-08	CQ-39
Grão	cpx-23	cpx-24	cpx-24	cpx-25	cpx-25	cpx-26	cpx-26	cpx-27
Posição	b	c	b	b	c	c	b	b
SiO ₂	54.54	54.33	54.44	53.74	53.83	53.16	52.86	54.82
TiO ₂	0.26	0.10	0.21	0.19	0.62	0.25	0.43	0.27
Al ₂ O ₃	-	0.00	0.01	0.02	0.00	-	0.02	-
Cr ₂ O ₃	-	0.02	0.01	-	0.01	0.01	0.00	-
FeO	2.70	3.99	3.39	3.85	4.11	6.18	5.49	2.41
Fe ₂ O ₃	2.16	4.85	3.30	4.22	2.90	4.32	4.36	2.71
MnO	0.12	0.21	0.21	0.19	0.19	0.27	0.23	0.09
NiO	0.02	0.00	0.02	0.00	-	0.03	-	0.01
MgO	16.42	13.48	14.74	13.85	14.26	12.26	12.46	16.17
CaO	24.99	23.04	24.18	23.94	24.02	22.95	23.09	24.43
Na ₂ O	0.28	1.56	0.95	1.08	0.96	1.30	1.31	0.67
K ₂ O	0.01	0.02	0.01	0.00	-	0.01	0.01	0.01
Total	101.50	101.61	101.45	101.09	100.89	100.73	100.27	101.59
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.974	1.986	1.982	1.975	1.977	1.979	1.974	1.980
Ti	-	0.000	0.000	0.001	0.000	-	0.001	-
Fe ³⁺	0.026	0.014	0.017	0.024	0.023	0.021	0.025	0.020
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.007	0.003	0.006	0.005	0.017	0.007	0.012	0.007
Cr	-	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	-
Fe ³⁺	0.032	0.119	0.073	0.092	0.057	0.101	0.097	0.053
Mg	0.886	0.735	0.800	0.759	0.780	0.681	0.693	0.871
Ni	0.001	0.000	0.001	0.000	-	0.001	-	0.000
Fe ²⁺	0.074	0.122	0.103	0.118	0.126	0.193	0.171	0.068
Mn	-	0.006	0.007	0.006	0.006	0.008	0.007	-
ΣM1	1.000	0.986	0.989	0.980	0.987	0.990	0.981	1.000
Ca	0.969	0.902	0.943	0.943	0.945	0.915	0.924	0.945
Na	0.020	0.111	0.067	0.077	0.068	0.094	0.094	0.047
K	0.000	0.001	0.000	0.000	-	0.000	0.001	0.001
Fe ²⁺	0.007	-	-	-	-	-	-	0.005
Mn	0.004	-	-	-	-	-	-	0.003
ΣM2	1.000	1.014	1.011	1.020	1.013	1.010	1.019	1.000
Di	2.0	11.4	6.9	8.0	6.9	9.6	9.8	4.7
Hd	89.4	75.4	81.9	79.0	79.6	69.8	71.7	87.7
Aeg	8.6	13.2	11.3	12.9	13.5	20.6	18.5	7.6

Unidade	B2b	B2b	B2b	B2b	C2a	C2a	C2a	C2a
Amostra	CQ-39	CQ-39	CQ-39	CQ-39	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-58
Grão	cpx-27	cpx-28	cpx-29	cpx-30	cpx-31	cpx-32	cpx-32	cpx-33
Posição	c	b	-	c	c	c	b	b
SiO ₂	54.87	54.98	54.81	55.07	53.60	53.36	52.85	53.52
TiO ₂	0.16	0.20	0.27	0.19	0.32	0.29	0.25	0.20
Al ₂ O ₃	0.01	0.00	0.02	-	0.02	0.12	0.11	0.06
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	-	0.02	0.01	-	-	-
FeO	1.95	2.32	2.36	1.44	3.19	3.47	5.99	4.09
Fe ₂ O ₃	2.35	2.40	2.52	2.90	3.62	3.72	4.23	8.26
MnO	0.16	0.16	0.18	0.16	0.19	0.20	0.23	0.14
NiO	-	-	0.00	-	0.00	-	-	-
MgO	16.38	16.33	16.15	16.43	14.81	14.80	12.48	11.41
CaO	25.47	25.12	25.05	25.16	24.83	25.12	23.38	19.08
Na ₂ O	0.39	0.45	0.49	0.62	0.57	0.40	1.07	3.26
K ₂ O	0.00	0.02	0.03	0.01	0.04	0.00	0.02	0.01
Total	101.75	101.99	101.88	101.99	101.21	101.48	100.61	100.03
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.977	1.978	1.976	1.977	1.962	1.952	1.970	1.995
Ti	0.000	0.000	0.001	-	0.001	0.005	0.005	0.002
Fe ³⁺	0.022	0.022	0.023	0.023	0.037	0.043	0.025	0.002
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.004	0.005	0.007	0.005	0.009	0.008	0.007	0.006
Cr	0.000	0.000	-	0.000	0.000	-	-	-
Fe ³⁺	0.041	0.043	0.045	0.056	0.063	0.060	0.094	0.229
Mg	0.880	0.876	0.868	0.880	0.808	0.807	0.693	0.634
Ni	-	-	0.000	-	0.000	-	-	-
Fe ²⁺	0.059	0.070	0.071	0.043	0.098	0.106	0.187	0.128
Mn	0.005	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.003
ΣM1	0.989	0.999	0.997	0.989	0.984	0.987	0.988	1.000
Ca	0.983	0.969	0.968	0.968	0.974	0.984	0.934	0.762
Na	0.027	0.031	0.034	0.043	0.041	0.028	0.077	0.236
K	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	-	0.002
ΣM2	1.011	1.001	1.003	1.011	1.016	1.013	1.012	1.000
Di	2.8	3.2	3.5	4.4	4.3	3.0	8.0	23.5
Hd	90.6	89.2	88.7	90.6	84.9	85.2	71.9	63.3
Aeg	6.6	7.6	7.8	5.0	10.9	11.9	20.1	13.2

Unidade	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a
Amostra	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ97-139.2
Grão	cpx-33	cpx-34	cpx-35	cpx-36	cpx-37	cpx-37	cpx-38	cpx-38
Posição	c	b	b	c	c	b	c	b
SiO ₂	52.94	53.43	53.26	54.11	54.83	53.07	53.81	53.58
TiO ₂	1.09	0.17	0.23	0.61	0.43	0.48	0.35	0.36
Al ₂ O ₃	0.21	0.06	0.10	0.03	0.00	0.17	0.02	0.09
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-
FeO	2.64	4.20	4.81	1.47	4.53	8.14	4.82	7.37
Fe ₂ O ₃	3.86	6.69	4.60	2.78	0.90	2.74	1.00	2.57
MnO	0.17	0.18	0.20	0.13	0.21	0.34	0.28	0.31
NiO	-	0.01	0.03	0.01	-	-	-	-
MgO	15.23	12.23	13.08	16.77	15.22	11.34	14.92	12.02
CaO	25.03	21.44	23.62	25.43	24.34	22.44	23.79	22.68
Na ₂ O	0.47	2.24	1.12	0.24	0.62	1.38	0.54	1.33
K ₂ O	0.02	-	0.02	0.02	0.01	0.02	-	0.02
Total	101.67	100.65	101.08	101.60	101.09	100.12	99.51	100.33
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.930	1.981	1.968	1.954	1.998	1.994	1.995	2.000
Ti	0.009	0.003	0.004	0.001	0.000	0.006	0.001	-
Fe ³⁺	0.061	0.016	0.028	0.045	0.002	-	0.004	-
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	0.002	-	0.004
Ti	0.030	0.005	0.006	0.017	0.012	0.014	0.010	0.010
Cr	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-
Fe ³⁺	0.045	0.170	0.101	0.031	0.023	0.077	0.024	0.072
Mg	0.828	0.676	0.720	0.903	0.827	0.635	0.825	0.669
Ni	-	0.000	0.001	0.000	-	-	-	-
Fe ²⁺	0.081	0.130	0.149	0.044	0.138	0.256	0.142	0.230
Mn	0.005	0.006	0.006	0.004	0.001	0.011	-	0.010
ΣM1	0.988	0.987	0.983	0.999	1.000	0.995	1.000	0.995
Ca	0.977	0.852	0.935	0.984	0.950	0.904	0.945	0.907
Na	0.034	0.161	0.081	0.017	0.043	0.100	0.039	0.096
K	0.001	-	0.001	0.001	0.001	0.001	-	0.001
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	0.008	-
Mn	-	-	-	-	0.006	-	0.009	-
ΣM2	1.012	1.013	1.017	1.001	1.000	1.005	1.000	1.004
Di	3.5	16.5	8.4	1.8	4.3	10.0	3.8	9.6
Hd	87.4	69.5	75.4	93.3	81.5	63.4	80.7	66.5
Aeg	9.1	14.0	16.2	5.0	14.2	26.6	15.5	23.9

Unidade	C2a	C2a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a
Amostra	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51
Grão	cpx-39	cpx-39	cpx-40	cpx-40	cpx-41	cpx-41	cpx-42	cpx-42
Posição	c	b	c	b	c	b	b	c
SiO ₂	52.58	54.52	53.16	52.96	51.84	52.39	52.01	52.41
TiO ₂	2.06	0.14	0.03	0.20	0.28	0.25	0.27	0.21
Al ₂ O ₃	0.50	0.04	0.06	0.09	0.18	0.20	0.23	0.13
Cr ₂ O ₃	0.03	-	0.00	0.01	-	-	0.01	0.01
FeO	4.73	6.74	5.83	7.20	8.96	9.03	9.48	7.97
Fe ₂ O ₃	1.90	2.39	9.61	10.69	5.96	6.70	6.29	6.78
MnO	-	0.19	0.28	0.24	0.32	0.35	0.30	0.32
NiO	0.00	0.00	0.02	-	-	-	0.01	-
MgO	14.30	13.02	9.43	7.97	9.20	9.09	8.99	9.66
CaO	23.99	22.01	17.92	15.69	20.67	20.00	20.65	20.76
Na ₂ O	0.80	1.50	3.81	4.68	2.17	2.51	2.19	2.30
K ₂ O	0.02	0.01	0.02	0.02	-	0.00	0.00	0.02
Total	100.92	100.56	100.17	99.75	99.59	100.53	100.43	100.58
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.934	2.016	2.001	2.012	1.983	1.985	1.978	1.979
Ti	0.022	-	-	-	0.008	0.009	0.011	0.006
Fe ³⁺	0.044	-	-	-	0.009	0.006	0.012	0.015
ΣT	2.000	2.016	2.001	2.012	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	0.002	0.003	0.004	-	-	-	-
Ti	0.057	0.004	0.001	0.006	0.008	0.007	0.008	0.006
Cr	0.001	-	0.000	0.000	-	-	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.009	0.066	0.272	0.306	0.162	0.185	0.168	0.178
Mg	0.784	0.718	0.529	0.451	0.525	0.514	0.510	0.544
Ni	0.000	0.000	0.001	-	-	-	0.000	-
Fe ²⁺	0.145	0.208	0.184	0.229	0.286	0.286	0.301	0.252
Mn	-	0.002	0.009	0.004	0.010	0.008	0.010	0.010
ΣM1	0.996	1.000	0.998	1.000	0.992	1.000	0.997	0.990
Ca	0.946	0.872	0.723	0.639	0.847	0.812	0.841	0.840
Na	0.057	0.108	0.278	0.345	0.161	0.184	0.161	0.169
K	0.001	0.001	0.001	0.001	-	0.000	0.000	0.001
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	0.004	-	0.003	-	0.003	-	-
ΣM2	1.004	0.984	1.001	0.988	1.008	1.000	1.003	1.010
Di	5.8	10.4	27.8	33.4	16.4	18.5	16.4	17.3
Hd	79.5	69.0	52.9	43.7	53.4	51.6	51.9	55.8
Aeg	14.7	20.6	19.3	22.9	30.2	29.9	31.7	26.9

Unidade	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a
Amostra	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ97-462.8	CQ97-462.8
Grão	cpx-43	cpx-43	cpx-44	cpx-44	cpx-45	cpx-45	cpx-46	cpx-46
Posição	c	b	c	b	b	c	c	b
SiO ₂	52.14	52.41	51.95	52.88	52.56	52.24	51.23	51.53
TiO ₂	0.20	0.19	0.22	0.18	0.26	0.22	1.08	0.34
Al ₂ O ₃	0.14	0.13	0.23	0.08	0.07	0.18	0.06	0.03
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.01	-	-	0.00	0.03	-
FeO	9.24	8.35	8.36	8.19	7.85	8.29	4.75	4.11
Fe ₂ O ₃	5.81	6.56	7.30	7.10	7.12	6.40	6.51	7.67
MnO	0.28	0.41	0.33	0.27	0.29	0.30	0.14	0.20
NiO	0.02	-	-	0.03	0.01	0.01	0.04	-
MgO	9.31	9.57	9.12	9.35	9.56	9.66	11.67	11.52
CaO	21.14	20.98	20.50	19.24	19.30	20.96	21.35	21.04
Na ₂ O	2.00	2.19	2.39	2.92	2.81	2.15	1.97	2.18
K ₂ O	0.01	-	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.01
Total	100.29	100.78	100.41	100.24	99.87	100.41	98.82	98.63
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.982	1.979	1.972	2.000	1.994	1.978	1.947	1.960
Ti	0.006	0.006	0.010	0.000	0.003	0.008	0.003	0.001
Fe ³⁺	0.012	0.016	0.017	-	0.003	0.014	0.050	0.039
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	0.003	-	-	-	-
Ti	0.006	0.005	0.006	0.005	0.007	0.006	0.031	0.010
Cr	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	0.001	-
Fe ³⁺	0.154	0.170	0.191	0.202	0.200	0.168	0.136	0.181
Mg	0.528	0.538	0.516	0.527	0.541	0.545	0.661	0.653
Ni	0.001	-	-	0.001	0.000	0.000	0.001	-
Fe ²⁺	0.294	0.264	0.265	0.259	0.249	0.262	0.151	0.131
Mn	0.009	0.013	0.011	0.003	0.003	0.010	0.004	0.006
ΣM1	0.991	0.991	0.990	1.000	1.000	0.992	0.985	0.981
Ca	0.861	0.849	0.834	0.780	0.785	0.850	0.869	0.857
Na	0.148	0.160	0.176	0.214	0.207	0.158	0.145	0.161
K	0.000	-	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	-	-	0.006	0.007	-	-	-
ΣM2	1.009	1.009	1.010	1.000	1.000	1.008	1.015	1.019
Di	15.1	16.4	18.2	21.3	20.6	16.2	15.1	16.9
Hd	53.9	55.2	53.3	52.2	53.8	55.9	68.7	68.7
Aeg	31.0	28.4	28.5	26.5	25.7	27.9	16.2	14.4

Unidade	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3b	B3b
Amostra	CQ97-462.8	CQ97-462.8	CQ97-462.8	CQ97-462.8	CQ97-462.8	CQ97	CQ-75	CQ-75
Grão	cpx-47	cpx-47	cpx-48	cpx-48	cpx-49	cpx-50	cpx-51	cpx-51
Posição	b	c	b	c	c	b	c	b
SiO ₂	51.71	51.06	51.52	51.45	52.06	51.52	52.57	52.44
TiO ₂	1.01	0.39	0.32	0.42	0.09	0.12	0.26	0.23
Al ₂ O ₃	0.06	0.07	0.08	0.05	0.02	0.10	0.22	0.16
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0.04	0.09	0.17	-	-
FeO	4.06	4.73	3.98	3.81	2.91	5.91	9.19	7.56
Fe ₂ O ₃	5.37	7.02	7.44	7.02	5.00	6.07	6.22	7.81
MnO	0.24	0.27	0.24	0.25	0.15	0.25	0.31	0.28
NiO	0.01	0.06	-	-	0.01	0.04	0.00	-
MgO	12.80	11.38	11.75	11.26	13.06	10.23	9.22	9.04
CaO	21.71	20.77	21.51	21.05	22.22	20.22	20.27	18.45
Na ₂ O	1.66	2.03	1.97	2.33	1.62	2.45	2.40	3.30
K ₂ O	0.03	0.01	0.02	-	-	-	0.01	0.01
Total	98.65	97.80	98.81	97.67	97.22	97.08	100.68	99.28
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.955	1.961	1.956	1.972	1.984	1.995	1.987	2.000
Ti	0.003	0.003	0.004	0.002	0.001	0.005	0.010	0.000
Fe ³⁺	0.042	0.035	0.041	0.026	0.015	0.000	0.003	-
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	-	-	0.007
Ti	0.029	0.011	0.009	0.012	0.003	0.004	0.007	0.007
Cr	-	-	-	0.001	0.003	0.005	-	-
Fe ³⁺	0.110	0.167	0.172	0.176	0.128	0.177	0.174	0.224
Mg	0.721	0.652	0.665	0.643	0.742	0.590	0.520	0.514
Ni	0.000	0.002	-	-	0.000	0.001	0.000	-
Fe ²⁺	0.129	0.152	0.126	0.122	0.093	0.191	0.291	0.241
Mn	0.008	0.009	0.008	0.008	0.005	0.008	0.008	0.007
ΣM1	0.997	0.993	0.980	0.963	0.973	0.977	1.000	1.000
Ca	0.880	0.855	0.875	0.864	0.907	0.839	0.821	0.754
Na	0.122	0.151	0.145	0.173	0.120	0.184	0.176	0.244
K	0.001	0.001	0.001	-	-	-	0.001	0.000
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	0.002	0.002
ΣM2	1.003	1.007	1.020	1.037	1.027	1.023	1.000	1.000
Di	12.4	15.7	15.3	18.3	12.5	18.9	17.7	24.2
Hd	73.7	67.6	70.4	68.0	77.3	60.6	52.2	51.0
Aeg	13.9	16.7	14.2	13.8	10.2	20.5	30.2	24.8

Unidade	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b
Amostra	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75
Grão	cpx-52	cpx-52	cpx-53	cpx-53	cpx-54	cpx-54	cpx-55	cpx-55
Posição	c	b	b	c	c	b	b	c
SiO ₂	52.33	52.50	52.15	51.97	51.47	52.71	51.70	52.12
TiO ₂	0.21	0.28	0.25	0.31	0.28	0.25	0.29	0.31
Al ₂ O ₃	0.20	0.21	0.21	0.25	0.22	0.15	0.20	0.19
Cr ₂ O ₃	-	0.00	0.00	0.01	-	-	-	0.00
FeO	9.20	9.11	8.40	9.11	8.77	6.65	8.26	9.04
Fe ₂ O ₃	6.16	6.47	7.36	7.05	7.11	9.10	7.68	7.03
MnO	0.33	0.33	0.31	0.34	0.33	0.27	0.33	0.30
NiO	-	0.01	0.00	-	-	-	0.01	0.00
MgO	9.07	9.15	9.13	8.84	8.87	9.16	8.93	8.87
CaO	20.40	20.18	19.85	20.09	20.29	17.48	20.00	20.06
Na ₂ O	2.35	2.46	2.62	2.47	2.35	3.79	2.56	2.53
K ₂ O	0.02	0.01	-	-	0.00	0.01	0.01	0.00
Total	100.26	100.70	100.28	100.45	99.69	99.57	99.96	100.45
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.988	1.986	1.980	1.976	1.972	1.999	1.972	1.980
Ti	0.009	0.009	0.009	0.011	0.010	0.001	0.009	0.008
Fe ³⁺	0.003	0.005	0.011	0.013	0.018	-	0.019	0.012
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	0.006	-	-
Ti	0.006	0.008	0.007	0.009	0.008	0.007	0.008	0.009
Cr	-	0.000	0.000	0.000	-	-	-	0.000
Fe ³⁺	0.173	0.179	0.199	0.188	0.187	0.260	0.202	0.189
Mg	0.514	0.516	0.517	0.501	0.506	0.518	0.508	0.502
Ni	-	0.000	0.000	-	-	-	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.292	0.288	0.267	0.290	0.281	0.209	0.263	0.287
Mn	0.011	0.009	0.010	0.011	0.011	-	0.011	0.010
ΣM1	0.996	1.000	1.000	1.000	0.993	1.000	0.992	0.997
Ca	0.830	0.818	0.807	0.818	0.833	0.710	0.818	0.816
Na	0.173	0.180	0.193	0.182	0.174	0.278	0.190	0.186
K	0.001	0.000	-	-	0.000	0.000	0.001	0.000
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	0.002	-	-
Mn	-	0.002	-	-	-	0.009	-	-
ΣM2	1.004	1.000	1.000	1.000	1.007	1.000	1.008	1.003
Di	17.5	18.1	19.6	18.5	17.9	27.4	19.5	18.9
Hd	51.9	51.9	52.4	50.9	52.1	51.0	52.3	51.0
Aeg	30.6	30.0	28.1	30.6	30.0	21.6	28.2	30.1

Unidade	B3b	B3b	B3b	B3b	C3	C3	C3	C3
Amostra	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9
Grão	cpx-56	cpx-56	cpx-57	cpx-57	cpx-58	cpx-59	cpx-60	cpx-60
Posição	c	b	c	b	-	-	-	-
SiO ₂	51.78	51.45	50.53	51.26	51.10	51.10	51.95	51.47
TiO ₂	-	0.34	0.36	0.25	0.13	0.41	0.42	0.45
Al ₂ O ₃	0.13	0.20	0.23	0.15	0.03	0.04	0.06	0.06
Cr ₂ O ₃	0.06	0.02	-	-	0.09	-	-	0.06
FeO	8.14	7.40	9.16	8.61	2.16	4.77	1.66	1.77
Fe ₂ O ₃	6.90	7.28	5.88	5.48	20.36	15.08	18.43	18.30
MnO	0.32	0.32	0.38	0.43	0.08	0.24	0.16	0.28
NiO	0.01	0.09	0.03	-	-	0.01	0.04	-
MgO	9.37	9.98	9.54	9.62	5.91	6.98	7.18	5.81
CaO	20.23	20.31	19.87	19.21	11.53	14.25	13.67	11.70
Na ₂ O	2.57	2.21	2.58	2.99	7.25	5.55	6.54	7.44
K ₂ O	0.04	0.02	0.01	-	0.02	0.01	-	0.01
Total	99.55	99.62	98.56	97.98	98.67	98.44	100.11	97.36
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.976	1.962	1.948	1.976	1.970	1.976	1.964	1.998
Ti	0.006	0.009	0.011	0.007	0.001	0.002	0.002	0.002
Fe ³⁺	0.019	0.029	0.041	0.017	0.028	0.022	0.033	-
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	-	-	-	-	0.000
Ti	-	0.010	0.010	0.007	0.004	0.012	0.012	0.013
Cr	0.002	0.001	-	-	0.003	-	-	0.002
Fe ³⁺	0.215	0.183	0.224	0.232	0.562	0.417	0.491	0.535
Mg	0.533	0.567	0.548	0.553	0.340	0.403	0.405	0.336
Ni	0.000	0.003	0.001	-	-	0.000	0.001	-
Fe ²⁺	0.220	0.232	0.190	0.177	0.070	0.154	0.053	0.057
Mn	0.010	0.005	0.013	0.014	0.003	0.008	0.005	0.009
ΣM1	0.981	1.000	0.986	0.983	0.981	0.993	0.967	0.953
Ca	0.827	0.830	0.821	0.794	0.476	0.590	0.554	0.487
Na	0.190	0.164	0.193	0.223	0.542	0.416	0.479	0.560
K	0.002	0.001	0.001	-	0.001	0.000	-	0.001
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	0.005	-	-	-	-	-	-
ΣM2	1.019	1.000	1.014	1.017	1.019	1.007	1.033	1.047
Di	20.0	16.8	20.4	23.1	56.8	42.4	50.9	58.1
Hd	55.9	58.3	58.1	57.2	35.6	41.1	43.0	34.9
Aeg	24.2	24.9	21.4	19.7	7.6	16.5	6.1	6.9

Unidade	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Amostra	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1
Grão	cpx-61	cpx-61	cpx-62	cpx-63	cpx-64	cpx-64	cpx-64	cpx-65
Posição	c	b	-	-	b	c	b	c
SiO ₂	50.99	50.92	50.72	51.37	51.11	51.39	52.55	50.57
TiO ₂	0.51	0.49	0.22	0.04	0.41	-	0.30	0.19
Al ₂ O ₃	0.06	0.09	0.05	0.09	0.12	0.06	0.06	0.07
Cr ₂ O ₃	-	0.02	-	-	-	0.01	-	0.00
FeO	10.42	10.00	5.52	5.67	8.50	6.37	5.05	8.38
Fe ₂ O ₃	4.25	4.69	9.93	9.48	7.16	9.17	12.36	7.83
MnO	0.63	0.49	0.71	0.42	0.48	0.40	0.24	0.54
NiO	0.01	-	-	-	-	0.10	-	-
MgO	8.13	8.44	8.10	8.42	8.38	8.32	8.05	8.22
CaO	20.73	20.38	18.45	18.21	20.40	19.01	16.37	20.21
Na ₂ O	2.01	2.09	3.56	3.67	2.46	3.32	4.84	2.40
K ₂ O	-	-	0.00	-	0.01	0.00	0.02	0.02
Total	97.74	97.61	97.27	97.36	99.02	98.14	99.82	98.42
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Si	1.997	1.993	1.982	1.996	1.974	1.990	1.992	1.969
Ti	0.003	0.004	0.002	0.004	0.005	0.003	0.003	0.003
Fe ³⁺	0.000	0.003	0.016	-	0.021	0.008	0.005	0.028
ΣT	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-	0.001	-	-	-	-
Ti	0.015	0.015	0.006	0.001	0.012	-	0.009	0.006
Cr	-	0.001	-	-	-	0.000	-	0.000
Fe ³⁺	0.125	0.136	0.275	0.277	0.187	0.259	0.347	0.202
Mg	0.475	0.492	0.472	0.488	0.482	0.480	0.455	0.477
Ni	0.000	-	-	-	-	0.003	-	-
Fe ²⁺	0.341	0.327	0.180	0.184	0.275	0.206	0.160	0.273
Mn	0.021	0.016	0.024	0.014	0.016	0.013	0.008	0.018
ΣM1	0.978	0.987	0.958	0.965	0.971	0.962	0.978	0.975
Ca	0.870	0.855	0.772	0.758	0.844	0.789	0.665	0.843
Na	0.152	0.158	0.270	0.277	0.184	0.249	0.356	0.181
K	-	-	0.000	-	0.001	0.000	0.001	0.001
Fe ²⁺	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-
ΣM2	1.022	1.013	1.042	1.035	1.029	1.038	1.022	1.025
Di	15.4	15.9	28.5	28.7	19.2	26.2	36.4	19.1
Hd	48.0	49.5	49.9	50.7	50.4	50.6	46.5	50.3
Aeg	36.6	34.5	21.6	20.6	30.3	23.1	17.1	30.6

Unidade	C3	C3	C3
Amostra	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1
Grão	cpx-65	cpx-66	cpx-66
Posição	b	c	b
SiO ₂	51.86	51.49	51.24
TiO ₂	0.54	0.38	0.42
Al ₂ O ₃	0.06	0.07	0.09
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.06
FeO	10.38	5.54	6.21
Fe ₂ O ₃	5.96	11.42	10.58
MnO	0.36	0.35	0.32
NiO	0.12	-	0.02
MgO	8.35	8.49	8.51
CaO	20.44	17.88	18.10
Na ₂ O	2.27	3.87	3.61
K ₂ O	0.01	-	0.00
Total	100.38	99.50	99.16
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios			
Si	1.982	1.967	1.967
Ti	0.003	0.003	0.004
Fe ³⁺	0.016	0.030	0.030
ΣT	2.000	2.000	2.000
Al	-	-	-
Ti	0.016	0.011	0.012
Cr	0.000	0.000	0.002
Fe ³⁺	0.156	0.298	0.276
Mg	0.475	0.484	0.487
Ni	0.004	-	0.000
Fe ²⁺	0.332	0.177	0.199
Mn	0.012	0.011	0.010
ΣM1	0.994	0.981	0.987
Ca	0.837	0.732	0.744
Na	0.168	0.287	0.269
K	0.001	-	0.000
Fe ²⁺	-	-	-
Mn	-	-	-
ΣM2	1.006	1.019	1.013
Di	17.0	29.9	27.8
Hd	48.2	50.4	50.5
Aeg	34.8	19.6	21.7

Tabela C. Análises de mica em Catalão II. *Valores calculados com base em critérios estequiométricos

Litho	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
Amostra	CQ-01	CQ-01	CQ-01	CQ-01	CQ-01	CQ-02	CQ-02	CQ-02
Grão	mica-1	mica-2	mica-2	mica-3	mica-3	mica-4	mica-4	mica-5
Posição	c	c	b	c	b	c	b	b
SiO ₂	40.23	41.43	41.03	41.49	39.97	39.67	39.75	40.45
TiO ₂	0.79	0.78	0.80	0.78	0.80	0.70	0.54	0.53
Al ₂ O ₃	9.36	9.76	9.47	9.60	9.41	5.76	5.56	5.69
FeO _T	15.06	15.32	15.11	15.47	14.90	16.67	17.25	16.89
Fe ₂ O ₃ *	3.46	2.41	2.74	2.32	3.45	8.96	8.94	8.64
FeO*	11.95	13.15	12.65	13.39	11.79	8.60	9.20	9.12
MnO	0.23	0.25	0.27	0.23	0.20	0.16	0.13	0.11
MgO	19.17	19.78	19.79	19.79	19.23	20.96	20.73	21.01
CaO	-	-	0.00	0.04	0.01	0.07	0.05	-
Na ₂ O	0.11	0.00	0.04	0.02	0.04	0.12	0.07	0.08
K ₂ O	11.39	9.28	9.11	8.34	11.35	11.17	10.96	11.26
BaO	-	0.02	-	0.01	-	0.00	0.02	0.04
H ₂ O*	4.04	4.10	4.07	3.95	4.02	3.99	3.86	4.02
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	-	-	-	-	0.01	-
V ₂ O ₃	0.00	-	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
NiO	-	-	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	-
F	-	-	-	0.29	-	-	0.24	-
Cl	0.01	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	-	0.10	0.00
Total	100.73	100.97	100.00	100.17	100.29	100.18	99.99	100.97
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	-	0.001	-	0.000	-	0.000	0.001	0.002
Ca	-	-	0.001	0.006	0.001	0.011	0.008	-
Na	0.030	0.000	0.013	0.007	0.010	0.034	0.020	0.024
K	2.158	1.730	1.714	1.560	2.159	2.143	2.110	2.140
ΣI	2.189	1.731	1.727	1.573	2.170	2.187	2.138	2.166
Si	5.974	6.054	6.050	6.085	5.960	5.965	5.995	6.030
^(IV) Al	1.639	1.681	1.646	1.659	1.653	1.021	0.989	1.000
^(IV) Fe ³⁺	0.386	0.265	0.304	0.256	0.387	1.014	1.015	0.969
ΣT	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.088	0.086	0.089	0.086	0.089	0.079	0.061	0.060
Cr	0.001	0.000	-	-	-	-	0.001	-
Fe ²⁺	1.484	1.607	1.559	1.642	1.471	1.082	1.161	1.137
Mn	0.029	0.030	0.033	0.029	0.025	0.020	0.016	0.014
Mg	4.243	4.309	4.349	4.325	4.274	4.698	4.662	4.668
Ni	-	-	0.001	0.003	0.002	0.000	0.001	-
V	0.000	-	0.003	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002
ΣM	5.846	6.032	6.034	6.086	5.861	5.882	5.905	5.881
OH	3.998	4.000	3.999	3.866	4.000	4.000	3.885	4.000
F	-	-	-	0.134	-	-	0.114	-
Cl	0.002	0.000	0.001	-	0.000	-	0.001	0.000

Unidade	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1
Amostra	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CQ-02	CQ97-71.6
Grão	mica-5	mica-6	mica-6	mica-7	mica-7	mica-8	mica-8	mica-9
Posição	c	c	b	b	c	c	b	b
SiO ₂	39.86	39.94	39.94	39.75	39.59	40.30	40.18	39.96
TiO ₂	0.60	0.74	0.73	0.36	0.65	0.84	0.58	0.52
Al ₂ O ₃	5.66	6.00	5.95	6.81	5.89	6.15	6.02	8.88
FeO _T	16.55	16.56	16.60	15.46	16.52	15.68	16.84	12.32
Fe ₂ O ₃ *	8.90	8.58	8.54	7.67	8.55	7.99	8.32	4.30
FeO*	8.54	8.83	8.92	8.56	8.82	8.50	9.35	8.45
MnO	0.14	0.13	0.15	0.14	0.17	0.12	0.15	0.33
MgO	21.02	20.93	20.82	21.47	20.76	20.99	20.84	21.53
CaO	-	-	0.08	0.00	0.00	-	0.01	0.05
Na ₂ O	0.07	0.05	0.09	0.01	0.06	0.09	0.02	0.06
K ₂ O	11.36	11.41	11.07	11.65	11.23	11.26	11.24	10.32
BaO	0.02	0.01	-	0.00	0.02	0.03	0.02	-
H ₂ O*	3.99	4.01	4.00	4.01	3.97	4.01	4.01	3.48
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	-	0.06
V ₂ O ₃	0.04	-	0.06	0.01	-	0.02	-	0.05
NiO	0.02	-	-	0.02	0.01	-	-	0.05
F	-	-	-	-	-	-	-	1.14
Cl	-	-	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	-
-O = (F,Cl) ₂	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48
Total	100.21	100.63	100.36	100.48	99.73	100.32	100.74	98.69
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.001	0.001	-	0.000	0.001	0.002	0.001	-
Ca	-	-	0.013	0.000	0.001	-	0.002	0.008
Na	0.019	0.015	0.027	0.002	0.017	0.027	0.005	0.018
K	2.178	2.178	2.116	2.220	2.163	2.145	2.143	1.963
ΣI	2.198	2.193	2.157	2.222	2.182	2.174	2.150	1.989
Si	5.990	5.975	5.986	5.937	5.979	6.019	6.004	5.957
^(IV) Al	1.003	1.057	1.051	1.200	1.048	1.083	1.059	1.560
^(IV) Fe ³⁺	1.006	0.966	0.963	0.862	0.972	0.898	0.936	0.482
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	8.000
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.068	0.084	0.082	0.041	0.074	0.094	0.066	0.058
Cr	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	-	0.007
Fe ²⁺	1.074	1.105	1.118	1.069	1.114	1.061	1.168	1.054
Mn	0.018	0.017	0.020	0.018	0.021	0.016	0.020	0.042
Mg	4.711	4.667	4.650	4.781	4.674	4.673	4.642	4.784
Ni	0.002	-	-	0.003	0.001	-	-	0.006
V	0.005	-	0.007	0.002	-	0.002	-	0.005
ΣM	5.878	5.873	5.877	5.915	5.886	5.846	5.896	5.956
OH	4.000	4.000	4.000	3.999	3.999	3.998	3.998	3.462
F	-	-	-	-	-	-	-	0.538
Cl	-	-	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	-

Unidade	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2a	B2a
Amostra	CQ97-71.6	CQ97-71.6	CQ97-71.6	CTII4-444.6	CTII4-444.6	CTII4-444.6	CTII4-444.6	CQ-04	CQ-04
Grão	mica-10	mica-11	mica-11	mica-12	mica-12	mica-12	mica-13	mica-14	mica-14
Posição	b	c	b	c	b	b	b	c	b
SiO ₂	39.74	39.63	39.96	38.27	38.45	38.58	40.47	39.39	
TiO ₂	0.53	0.72	0.83	2.06	2.31	2.19	1.13	0.47	
Al ₂ O ₃	8.68	8.69	8.58	7.30	7.55	7.50	9.23	6.28	
FeO _T	12.41	12.45	12.93	18.50	17.58	17.59	14.33	18.09	
Fe ₂ O ₃ *	4.16	4.07	4.59	6.06	5.67	5.85	4.32	8.02	
FeO*	8.66	8.78	8.80	13.04	12.48	12.33	10.44	10.87	
MnO	0.13	0.17	0.21	0.35	0.44	0.30	0.14	0.16	
MgO	21.34	21.00	21.10	16.45	16.62	17.02	20.91	19.97	
CaO	0.03	-	-	0.03	0.01	0.02	-	-	
Na ₂ O	0.10	0.06	0.10	0.10	0.01	0.05	0.05	0.01	
K ₂ O	10.00	10.08	9.94	9.80	9.56	9.64	9.93	10.76	
BaO	0.07	0.07	0.06	0.09	0.05	0.03	0.01	0.02	
H ₂ O*	3.68	3.67	3.67	3.64	3.43	3.45	4.09	3.96	
Cr ₂ O ₃	-	-	0.12	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	
V ₂ O ₃	-	-	0.10	-	0.10	0.06	0.02	-	
NiO	0.10	-	-	-	0.02	0.04	0.02	0.01	
F	0.62	0.63	0.71	0.45	0.92	0.93	-	-	
Cl	0.00	-	0.02	-	-	-	-	-	
-O = (F,Cl) ₂	0.26	0.27	0.30	0.19	0.39	0.39	-	-	
Total	97.58	97.31	98.49	97.49	97.25	97.58	100.77	99.92	
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)									
Ba	0.004	0.004	0.004	0.005	0.003	0.002	0.001	0.001	
Ca	0.005	-	-	0.006	0.002	0.002	-	-	
Na	0.028	0.018	0.030	0.029	0.003	0.013	0.014	0.004	
K	1.922	1.943	1.896	1.945	1.890	1.899	1.856	2.078	
ΣI	1.959	1.966	1.930	1.985	1.898	1.917	1.870	2.084	
Si	5.986	5.989	5.972	5.952	5.959	5.955	5.929	5.965	
^(IV) Al	1.542	1.548	1.511	1.338	1.379	1.365	1.594	1.120	
^(IV) Fe ³⁺	0.472	0.463	0.516	0.710	0.661	0.680	0.477	0.914	
ΣT	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	7.999	
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ti	0.060	0.081	0.093	0.241	0.269	0.254	0.125	0.053	
Cr	-	-	0.015	0.006	0.003	0.001	0.000	0.001	
Fe ²⁺	1.091	1.110	1.101	1.697	1.618	1.591	1.279	1.377	
Mn	0.016	0.022	0.026	0.047	0.058	0.039	0.017	0.020	
Mg	4.792	4.732	4.701	3.814	3.840	3.916	4.567	4.508	
Ni	0.012	-	-	-	0.002	0.005	0.003	0.001	
V	-	-	0.012	-	0.013	0.007	0.003	-	
ΣM	5.970	5.946	5.948	5.804	5.802	5.814	5.994	5.960	
OH	3.702	3.698	3.658	3.780	3.551	3.548	4.000	4.000	
F	0.297	0.302	0.337	0.220	0.449	0.452	-	-	
Cl	0.001	-	0.005	-	-	-	-	-	

Unidade	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a
Amostra	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-05	CQ-05	CQ-05	CQ-05
Grão	mica-15	mica-15	mica-16	mica-16	mica-17	mica-17	mica-18	mica-18
Posição	c	b	c	b	b	c	c	b
SiO ₂	40.75	40.35	39.64	40.37	40.12	40.29	39.81	39.23
TiO ₂	1.71	0.46	2.54	1.29	0.38	0.47	0.36	0.31
Al ₂ O ₃	10.27	6.12	10.34	9.20	3.38	3.57	3.48	3.18
FeO _T	13.47	17.84	12.63	14.49	17.18	17.28	17.51	17.79
Fe ₂ O ₃ *	2.90	7.84	3.53	4.78	12.83	12.37	12.24	12.31
FeO*	10.86	10.78	9.45	10.19	5.64	6.15	6.50	6.72
MnO	0.11	0.15	0.14	0.12	0.09	0.09	0.10	0.11
MgO	20.95	20.75	19.62	20.76	23.37	22.97	22.53	22.03
CaO	-	0.01	-	0.04	0.01	-	0.01	0.06
Na ₂ O	0.06	0.01	0.12	0.05	0.16	0.10	0.12	0.11
K ₂ O	8.47	9.59	11.26	10.71	11.16	11.35	11.05	10.73
BaO	0.05	-	0.02	0.01	0.00	-	-	0.04
H ₂ O*	4.08	4.01	4.07	4.11	3.84	4.03	3.98	3.91
Cr ₂ O ₃	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-	0.00
V ₂ O ₃	0.05	-	-	0.03	0.02	0.01	0.04	0.01
NiO	-	0.01	-	-	0.01	0.00	0.05	0.01
F	0.10	-	0.03	-	0.39	-	-	-
Cl	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	-	0.01
-O = (F,Cl) ₂	0.04	0.00	0.01	0.00	0.17	0.00	-	0.00
Total	100.31	100.10	100.74	101.67	101.24	101.42	100.26	98.78
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.003	-	0.001	0.001	0.000	-	-	0.002
Ca	-	0.002	-	0.006	0.001	-	0.001	0.010
Na	0.018	0.002	0.034	0.015	0.045	0.029	0.036	0.034
K	1.570	1.830	2.109	1.994	2.119	2.153	2.123	2.097
ΣI	1.590	1.835	2.144	2.016	2.165	2.182	2.160	2.143
Si	5.923	6.037	5.821	5.892	5.969	5.989	5.995	6.007
^(IV) Al	1.759	1.080	1.789	1.583	0.593	0.626	0.618	0.574
^(IV) Fe ³⁺	0.317	0.883	0.390	0.525	1.437	1.384	1.387	1.418
ΣT	8.000	7.999	8.000	8.000	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.187	0.051	0.280	0.142	0.043	0.053	0.040	0.036
Cr	0.000	-	0.000	-	0.000	-	-	0.000
Fe ²⁺	1.320	1.349	1.160	1.244	0.701	0.764	0.818	0.860
Mn	0.013	0.019	0.017	0.015	0.011	0.011	0.012	0.015
Mg	4.539	4.628	4.294	4.518	5.184	5.090	5.057	5.028
Ni	-	0.002	-	-	0.002	0.000	0.006	0.001
V	0.005	-	-	0.003	0.002	0.001	0.005	0.001
ΣM	6.064	6.049	5.753	5.922	5.942	5.920	5.938	5.942
OH	3.955	4.000	3.985	4.000	3.815	3.999	4.000	3.998
F	0.045	-	0.013	-	0.184	-	-	-
Cl	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001	-	0.002

Unidade	B2a	B2a	B2a	B2a	B2b	B2b	B2b	B2b
Amostra	CQ-05	CQ-05	CQ-05	CQ-05	CQ-08	CQ-08	CQ-08	CQ-08
Grão	mica-19	mica-19	mica-20	mica-20	mica-21	mica-21	mica-22	mica-22
Posição	c	b	b	c	b	c	c	c
SiO ₂	40.12	40.26	40.20	40.01	39.32	38.94	38.75	38.19
TiO ₂	0.49	0.29	0.40	0.42	1.19	1.49	0.60	0.55
Al ₂ O ₃	3.19	3.19	3.17	3.11	5.32	5.06	4.77	4.94
FeO _T	17.73	18.05	17.58	17.82	21.98	21.86	23.53	23.53
Fe ₂ O ₃ *	12.73	12.91	12.43	12.82	9.28	9.01	9.31	9.17
FeO*	6.27	6.43	6.40	6.28	13.63	13.76	15.15	15.15
MnO	0.10	0.10	0.08	0.09	0.27	0.21	0.29	0.28
MgO	22.64	22.98	22.52	22.65	17.71	16.62	16.36	16.22
CaO	-	-	-	-	0.04	-	0.03	0.04
Na ₂ O	0.13	0.07	0.10	0.16	0.09	0.11	0.08	0.05
K ₂ O	11.24	11.26	11.27	11.19	10.06	10.31	10.67	10.71
BaO	0.01	0.02	-	0.02	-	0.01	0.03	-
H ₂ O*	4.01	4.03	4.00	4.00	3.94	3.87	3.85	3.82
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	-	-	-
V ₂ O ₃	0.04	0.03	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	-
NiO	0.02	-	-	-	-	0.02	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	-	0.00	-	0.00	-	0.01	-	0.01
-O = (F,Cl) ₂	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00
Total	101.00	101.57	100.60	100.78	100.85	99.43	99.89	99.12
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.000	0.001	-	0.001	-	0.001	0.002	-
Ca	-	-	-	-	0.007	-	0.005	0.008
Na	0.037	0.020	0.029	0.046	0.027	0.034	0.025	0.016
K	2.144	2.139	2.157	2.142	1.953	2.036	2.118	2.147
ΣI	2.182	2.160	2.186	2.189	1.987	2.071	2.150	2.170
Si	6.002	5.993	6.033	6.003	5.982	6.027	6.034	6.001
^(IV) Al	0.563	0.560	0.562	0.549	0.954	0.923	0.875	0.914
^(IV) Fe ³⁺	1.433	1.446	1.404	1.447	1.063	1.049	1.090	1.084
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.056	0.033	0.045	0.047	0.136	0.174	0.070	0.065
Cr	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	-	-	-
Fe ²⁺	0.784	0.801	0.803	0.788	1.734	1.781	1.973	1.991
Mn	0.013	0.012	0.010	0.012	0.035	0.028	0.038	0.038
Mg	5.050	5.100	5.039	5.067	4.016	3.835	3.798	3.799
Ni	0.002	-	-	-	-	0.003	-	-
V	0.005	0.004	0.004	0.002	0.000	0.001	0.001	-
ΣM	5.910	5.950	5.903	5.916	5.921	5.821	5.880	5.892
OH	4.000	3.999	4.000	3.999	4.000	3.998	4.000	3.999
F	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	-	0.001	-	0.001	-	0.002	-	0.001

Unidade	B2b	B2b	B2b	B2b	B2b	B2b	B2b	B2b
Amostra	CQ-08	CQ-08	CQ-08	CQ-39	CQ-39	CQ-39	CQ-39	CQ-39
Grão	mica-23	mica-24	mica-24	mica-25	mica-25	mica-26	mica-26	mica-27
Posição	inclusao	c	b	c	b	b	c	c
SiO ₂	38.27	38.80	38.62	40.74	40.59	39.62	40.32	40.27
TiO ₂	1.64	1.06	0.74	0.51	0.42	0.27	0.25	0.38
Al ₂ O ₃	5.20	5.30	5.03	5.70	5.83	2.71	3.88	3.40
FeO _T	21.26	21.15	22.13	13.36	12.47	17.28	15.76	15.60
Fe ₂ O ₃ *	9.67	9.34	9.54	9.23	8.82	13.09	11.80	12.56
FeO*	12.56	12.75	13.54	5.06	4.53	5.50	5.14	4.29
MnO	0.26	0.22	0.24	0.10	0.07	0.13	0.11	0.10
MgO	17.13	17.70	17.50	23.69	23.87	22.75	23.55	24.01
CaO	0.06	-	0.01	-	0.03	-	-	-
Na ₂ O	0.03	0.08	0.06	0.20	0.17	0.12	0.17	0.11
K ₂ O	10.80	11.10	10.73	11.49	11.44	11.35	11.51	11.44
BaO	0.03	0.00	-	0.01	-	0.00	0.02	0.00
H ₂ O*	3.87	3.90	3.88	4.08	4.00	3.95	3.89	4.03
Cr ₂ O ₃	0.00	-	-	0.00	-	0.02	0.01	0.00
V ₂ O ₃	0.03	-	-	-	0.04	0.00	-	-
NiO	0.02	0.01	0.02	0.01	-	0.02	0.01	-
F	-	-	-	-	0.12	-	0.29	-
Cl	-	-	0.01	0.00	0.00	-	0.00	0.01
-O = (F,Cl) ₂	-	-	0.00	0.00	0.05	-	0.12	0.00
Total	99.58	100.27	99.92	100.82	99.87	99.53	100.82	100.58
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.002	0.000	-	0.000	-	0.000	0.001	0.000
Ca	0.010	-	0.002	-	0.005	-	-	-
Na	0.010	0.025	0.018	0.057	0.048	0.035	0.048	0.031
K	2.133	2.175	2.116	2.155	2.157	2.200	2.184	2.173
ΣI	2.154	2.200	2.135	2.213	2.211	2.235	2.233	2.204
Si	5.924	5.960	5.972	5.991	6.002	6.018	5.998	5.995
^(IV) Al	0.949	0.960	0.917	0.988	1.016	0.484	0.680	0.596
^(IV) Fe ³⁺	1.127	1.079	1.110	1.021	0.982	1.496	1.321	1.407
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.190	0.122	0.087	0.056	0.047	0.030	0.028	0.042
Cr	0.000	-	-	0.000	-	0.003	0.001	0.000
Fe ²⁺	1.626	1.639	1.752	0.622	0.560	0.699	0.640	0.535
Mn	0.034	0.029	0.032	0.013	0.009	0.016	0.014	0.012
Mg	3.954	4.053	4.034	5.192	5.261	5.153	5.222	5.329
Ni	0.002	0.001	0.003	0.002	-	0.003	0.001	-
V	0.004	-	-	-	0.005	0.001	-	-
ΣM	5.810	5.844	5.906	5.885	5.881	5.905	5.906	5.918
OH	4.000	4.000	3.998	4.000	3.942	4.000	3.863	3.998
F	-	-	-	-	0.057	-	0.136	-
Cl	-	-	0.002	0.000	0.000	-	0.001	0.002

Unidade	B2b	B2b	B2b	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP
Amostra	CQ-39	CQ-39	CQ-39	CQ-42	CQ-42	CQ-42	CQ-42	CQ-42
Grão	mica-27	mica-28	mica-28	mica-29	mica-29	mica-30	mica-30	mica-31
Posição	b	c	b	b	c	c	b	b
SiO ₂	39.93	40.04	40.58	39.07	39.73	39.40	39.44	40.29
TiO ₂	0.32	0.22	0.31	0.44	0.44	0.05	0.03	0.12
Al ₂ O ₃	2.98	3.10	3.90	0.29	0.21	0.01	-	2.24
FeO _T	15.80	15.47	14.51	17.78	18.13	19.10	19.03	15.76
Fe ₂ O ₃ *	12.48	12.55	11.76	16.54	16.97	17.25	17.37	13.85
FeO*	4.57	4.18	3.92	2.90	2.86	3.58	3.40	3.30
MnO	0.08	0.07	0.08	0.10	0.10	0.11	0.08	0.10
MgO	23.24	23.76	24.34	23.45	24.15	23.96	24.22	24.48
CaO	0.06	0.01	0.06	0.12	0.01	-	-	-
Na ₂ O	0.12	0.13	0.12	0.04	0.02	0.03	-	0.12
K ₂ O	11.42	11.50	11.51	11.71	11.62	11.61	11.56	11.50
BaO	-	-	0.01	0.05	0.02	0.01	0.02	-
H ₂ O*	3.96	3.92	4.05	3.89	3.95	3.93	3.94	4.00
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.00	0.01	-	-
V ₂ O ₃	0.01	0.00	-	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01
NiO	0.01	0.02	0.01	-	0.00	0.01	0.01	0.02
F	-	0.13	-	-	-	-	-	-
Cl	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
Total	99.18	99.60	100.65	98.63	100.10	99.97	100.10	100.02
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	-	-	0.000	0.003	0.001	0.000	0.001	-
Ca	0.010	0.001	0.009	0.020	0.002	-	-	-
Na	0.034	0.037	0.034	0.013	0.007	0.010	-	0.034
K	2.206	2.209	2.174	2.305	2.248	2.261	2.246	2.200
ΣI	2.250	2.247	2.218	2.341	2.259	2.272	2.247	2.234
Si	6.045	6.027	6.007	6.026	6.025	6.015	6.008	6.040
^(IV) Al	0.532	0.551	0.681	0.053	0.037	0.001	-	0.396
^(IV) Fe ³⁺	1.422	1.422	1.311	1.920	1.937	1.982	1.991	1.563
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.036	0.025	0.034	0.051	0.050	0.005	0.004	0.014
Cr	-	-	-	-	0.000	0.001	-	-
Fe ²⁺	0.579	0.526	0.485	0.374	0.363	0.457	0.433	0.413
Mn	0.011	0.009	0.010	0.013	0.013	0.015	0.010	0.012
Mg	5.244	5.332	5.373	5.393	5.460	5.453	5.500	5.472
Ni	0.001	0.003	0.001	-	0.001	0.001	0.001	0.002
V	0.001	0.000	-	0.003	0.001	0.002	0.003	0.002
ΣM	5.872	5.895	5.904	5.834	5.888	5.934	5.951	5.915
OH	3.999	3.940	3.999	3.999	3.999	4.000	4.000	4.000
F	-	0.060	-	-	-	-	-	-
Cl	0.001	-	0.001	0.001	0.001	0.000	-	-

Unidade	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP
Amostra	CQ-42	CQ-54	CQ-54	CQ-54	CQ-54	CQ-54	CQ-54	CQ-57
Grão	mica-31	mica-32	mica-32	mica-33	mica-33	mica-34	mica-34	mica-35
Posição	c	b	c	c	b	b	c	c
SiO ₂	39.58	37.64	38.04	36.93	36.32	36.83	36.63	37.87
TiO ₂	0.47	0.61	0.76	0.67	0.55	0.55	0.56	2.05
Al ₂ O ₃	3.13	2.20	3.27	1.79	0.17	0.18	0.11	6.84
FeO _T	16.35	29.00	25.56	30.35	33.74	32.74	32.81	21.43
Fe ₂ O ₃ *	12.69	13.13	11.62	13.25	15.56	15.71	15.70	7.24
FeO*	4.92	17.18	15.10	18.43	19.73	18.61	18.68	14.92
MnO	0.13	0.23	0.26	0.24	0.30	0.30	0.29	0.30
MgO	22.94	14.45	15.69	13.12	12.16	13.07	12.89	15.09
CaO	-	-	0.02	0.06	0.06	0.05	-	-
Na ₂ O	0.11	0.07	0.08	0.09	0.05	0.03	0.02	0.03
K ₂ O	11.56	11.14	11.23	10.79	10.61	10.75	10.84	11.19
BaO	0.02	0.00	0.01	-	0.01	-	-	-
H ₂ O*	3.96	3.76	3.79	3.67	3.62	3.66	3.64	3.85
Cr ₂ O ₃	0.01	-	0.01	-	-	0.00	0.01	0.01
V ₂ O ₃	0.00	0.05	0.01	0.01	0.03	0.06	0.03	0.01
NiO	0.01	0.01	-	-	-	0.05	0.01	0.01
F	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	0.01	-	0.01	0.00	-	-	-	-
-O = (F,Cl) ₂	0.00	-	0.00	0.00	-	-	-	-
Total	99.55	100.46	99.88	99.05	99.19	99.85	99.41	99.43
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.001	0.000	0.000	-	0.001	-	-	-
Ca	-	-	0.003	0.010	0.011	0.009	-	-
Na	0.032	0.022	0.024	0.029	0.017	0.009	0.007	0.011
K	2.234	2.268	2.262	2.248	2.244	2.245	2.276	2.223
ΣI	2.267	2.290	2.289	2.286	2.273	2.264	2.283	2.234
Si	5.994	6.008	6.009	6.028	6.023	6.028	6.032	5.896
^(IV) Al	0.558	0.414	0.609	0.344	0.034	0.035	0.020	1.255
^(IV) Fe ³⁺	1.447	1.577	1.382	1.627	1.942	1.936	1.946	0.848
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.054	0.073	0.090	0.082	0.069	0.067	0.070	0.241
Cr	0.001	-	0.001	-	-	0.000	0.001	0.001
Fe ²⁺	0.624	2.293	1.994	2.516	2.736	2.547	2.572	1.942
Mn	0.016	0.031	0.034	0.033	0.042	0.042	0.040	0.039
Mg	5.179	3.438	3.696	3.193	3.007	3.189	3.165	3.502
Ni	0.002	0.001	-	-	-	0.006	0.001	0.002
V	0.001	0.006	0.001	0.001	0.004	0.008	0.004	0.001
ΣM	5.876	5.842	5.817	5.825	5.858	5.860	5.853	5.729
OH	3.999	4.000	3.998	3.999	4.000	4.000	4.000	4.000
F	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	0.001	-	0.002	0.001	-	-	-	-

Unidade	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP
Amostra	CQ-57	CQ-57	CQ-57	CQ-57	CQ-57	CQ49	CQ49	CQ49
Grão	mica-35	mica-36	mica-36	mica-37	mica-37	mica-38	mica-39	mica-40
Posição	b	c	b	b	c	-	-	-
SiO ₂	38.22	38.95	38.17	38.12	37.63	40.68	40.64	40.54
TiO ₂	1.93	1.52	0.36	1.21	1.27	0.35	0.36	0.14
Al ₂ O ₃	7.01	6.23	2.19	5.02	3.49	2.00	1.95	1.97
FeO _T	18.71	18.31	25.16	20.20	26.01	16.12	15.96	16.73
Fe ₂ O ₃ *	7.23	8.39	12.85	9.58	11.83	14.09	13.58	13.57
FeO*	12.21	10.75	13.60	11.58	15.36	3.44	3.75	4.52
MnO	0.30	0.27	0.35	0.28	0.41	0.04	0.07	0.12
MgO	17.02	18.56	16.65	17.58	15.13	24.72	24.26	23.99
CaO	-	0.01	0.09	0.03	0.02	-	0.04	0.01
Na ₂ O	0.03	0.02	0.05	0.05	0.04	0.02	0.15	0.19
K ₂ O	11.29	11.45	11.26	11.33	11.20	10.21	9.99	9.92
BaO	-	0.04	0.00	0.02	0.01	-	0.02	0.02
H ₂ O*	3.89	3.94	3.78	3.84	3.80	3.68	3.71	3.60
Cr ₂ O ₃	-	0.00	0.00	0.00	-	0.07	-	-
V ₂ O ₃	0.04	0.02	-	0.02	0.02	0.08	-	-
NiO	0.00	-	-	-	-	0.11	-	0.03
F	-	-	-	-	-	0.71	0.56	0.78
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.24	0.33
Total	99.17	100.15	99.35	98.66	100.22	99.92	98.87	99.07
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	-	0.002	0.000	0.001	0.000	-	0.001	0.001
Ca	-	0.001	0.015	0.006	0.004	-	0.007	0.002
Na	0.010	0.006	0.015	0.015	0.011	0.006	0.043	0.056
K	2.219	2.220	2.279	2.256	2.256	1.943	1.919	1.907
ΣI	2.229	2.230	2.309	2.278	2.271	1.949	1.971	1.966
Si	5.888	5.923	6.057	5.951	5.943	6.066	6.116	6.111
^(IV) Al	1.273	1.116	0.409	0.923	0.650	0.351	0.345	0.349
^(IV) Fe ³⁺	0.838	0.960	1.534	1.126	1.406	1.582	1.537	1.539
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.223	0.174	0.043	0.142	0.151	0.039	0.041	0.015
Cr	-	0.000	0.001	0.000	-	0.008	-	-
Fe ²⁺	1.573	1.368	1.805	1.512	2.029	0.429	0.472	0.570
Mn	0.039	0.034	0.047	0.037	0.054	0.006	0.009	0.015
Mg	3.910	4.208	3.938	4.093	3.561	5.494	5.443	5.391
Ni	0.000	-	-	-	-	0.013	-	0.003
V	0.005	0.003	-	0.002	0.003	0.009	-	-
ΣM	5.751	5.787	5.833	5.787	5.799	5.998	5.965	5.995
OH	3.999	4.000	4.000	3.999	3.998	3.661	3.728	3.621
F	-	-	-	-	-	0.335	0.268	0.373
Cl	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.004	0.004	0.006

Unidade Amostra Grão Posição	FLAP CQ49 mica-41	FLAP CQ49 mica-42	FLAP CQ49 mica-43	FLAP CQ49 mica-44	FLAP CQ49 mica-45	FLAP CTII4-293.9 mica-46	FLAP CTII4-293.9 mica-46	FLAP CTII4-293.9 mica-47
	-	-	-	-	-	c	b	c
SiO ₂	39.88	41.00	40.50	40.41	39.86	38.09	39.74	38.05
TiO ₂	0.26	0.18	0.20	0.23	0.60	2.51	0.15	2.00
Al ₂ O ₃	1.60	0.97	1.07	1.20	1.46	4.78	1.74	5.21
FeO _T	15.74	16.81	16.69	16.49	17.01	22.68	15.12	23.12
Fe ₂ O ₃ *	14.56	15.54	15.56	15.46	14.85	9.49	14.71	8.85
FeO*	2.63	2.83	2.69	2.58	3.64	14.14	1.88	15.15
MnO	-	0.02	0.08	0.06	0.05	0.27	0.19	0.31
MgO	24.76	25.28	25.26	25.28	24.19	15.09	25.49	15.08
CaO	0.01	-	0.01	0.02	-	0.02	0.06	-
Na ₂ O	0.01	0.04	0.02	0.01	0.07	0.12	0.04	0.08
K ₂ O	10.55	10.55	10.45	10.41	9.88	9.61	10.14	9.72
BaO	0.03	-	0.02	0.01	0.00	0.07	0.08	0.12
H ₂ O*	3.49	3.59	3.57	3.52	3.66	3.54	3.55	3.51
Cr ₂ O ₃	0.04	0.02	-	-	-	-	0.02	-
V ₂ O ₃	-	0.04	-	0.06	-	0.10	-	-
NiO	-	-	-	-	-	0.03	-	-
F	0.97	0.94	0.93	1.02	0.63	0.58	0.87	0.62
Cl	-	-	-	0.01	-	0.00	-	0.01
-O = (F,Cl) ₂	0.41	0.39	0.39	0.43	0.27	0.24	0.37	0.26
Total	98.39	100.61	99.95	99.85	98.61	98.20	98.29	98.45
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.002	-	0.001	0.000	0.000	0.004	0.005	0.008
Ca	0.001	-	0.001	0.003	-	0.004	0.009	-
Na	0.003	0.013	0.004	0.002	0.021	0.036	0.013	0.024
K	2.041	2.000	1.993	1.988	1.911	1.927	1.957	1.951
ΣI	2.047	2.013	2.000	1.992	1.933	1.972	1.984	1.982
Si	6.050	6.092	6.059	6.046	6.044	5.991	6.013	5.985
^(IV) Al	0.286	0.169	0.188	0.212	0.260	0.886	0.310	0.966
^(IV) Fe ³⁺	1.663	1.738	1.752	1.741	1.695	1.123	1.675	1.048
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.030	0.020	0.023	0.026	0.068	0.297	0.017	0.236
Cr	0.005	0.003	-	-	-	-	0.003	-
Fe ²⁺	0.334	0.351	0.336	0.323	0.462	1.859	0.238	1.994
Mn	-	0.002	0.010	0.008	0.006	0.036	0.024	0.041
Mg	5.601	5.599	5.634	5.640	5.468	3.538	5.749	3.536
Ni	-	-	-	-	-	0.004	-	-
V	-	0.005	-	0.007	-	0.013	-	-
ΣM	5.969	5.980	6.003	6.004	6.003	5.748	6.030	5.808
OH	3.537	3.560	3.559	3.515	3.698	3.713	3.582	3.687
F	0.463	0.440	0.441	0.483	0.302	0.286	0.418	0.310
Cl	-	-	-	0.003	-	0.000	-	0.002

Unidade	FLAP	FLAP	FLAP	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a
Amostra	CTII4-293.9	CTII4-293.9	CTII4-293.9	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-58
Grão	mica-47	mica-48	mica-48	mica-49	mica-49	mica-50	mica-50	mica-51
Posição	b	c	b	c	b	c	b	c
SiO ₂	39.47	37.02	39.51	39.50	39.81	39.54	39.65	39.76
TiO ₂	0.06	2.13	0.07	0.63	0.87	1.25	1.06	1.56
Al ₂ O ₃	2.54	4.80	2.17	6.35	6.99	7.61	7.39	7.76
FeO _T	14.01	23.95	13.91	19.23	17.72	17.75	18.06	18.03
Fe ₂ O ₃ *	14.08	10.33	14.37	7.45	6.86	6.26	6.83	6.30
FeO*	1.34	14.66	0.98	12.52	11.55	12.12	11.91	12.36
MnO	0.05	0.32	0.05	0.37	0.33	0.30	0.33	0.20
MgO	26.12	15.12	26.16	18.42	18.84	18.34	18.83	18.18
CaO	0.01	-	0.03	0.02	0.02	-	0.00	-
Na ₂ O	0.04	0.04	0.01	0.07	0.06	0.03	0.01	0.06
K ₂ O	10.41	9.77	10.40	10.83	11.58	11.44	11.49	11.46
BaO	0.03	-	0.08	0.00	-	0.02	0.01	0.00
H ₂ O*	3.49	3.35	3.47	3.94	3.99	3.99	4.01	4.02
Cr ₂ O ₃	-	0.14	-	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
V ₂ O ₃	0.02	-	-	0.03	0.03	0.01	0.02	0.05
NiO	-	0.10	-	0.00	-	-	-	-
F	1.03	0.90	1.03	-	-	-	-	-
Cl	-	0.00	-	0.01	0.00	0.01	-	0.01
-O = (F,Cl) ₂	0.43	0.38	0.44	0.00	0.00	0.00	-	0.00
Total	98.25	98.29	97.91	100.15	100.93	100.92	101.55	101.73
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.002	-	0.005	0.000	-	0.001	0.001	0.000
Ca	0.001	-	0.004	0.004	0.003	-	0.000	-
Na	0.011	0.013	0.004	0.019	0.018	0.008	0.004	0.017
K	2.002	1.976	2.006	2.102	2.221	2.195	2.191	2.180
ΣI	2.016	1.989	2.019	2.126	2.242	2.204	2.196	2.198
Si	5.951	5.869	5.977	6.008	5.985	5.943	5.928	5.929
^(IV) Al	0.451	0.898	0.387	1.138	1.239	1.348	1.302	1.364
^(IV) Fe ³⁺	1.597	1.232	1.635	0.853	0.776	0.708	0.769	0.707
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	8.000	8.000	8.000	8.000
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.006	0.253	0.008	0.072	0.098	0.142	0.119	0.175
Cr	-	0.017	-	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
Fe ²⁺	0.170	1.944	0.124	1.592	1.452	1.523	1.489	1.541
Mn	0.007	0.043	0.007	0.047	0.041	0.038	0.042	0.025
Mg	5.871	3.573	5.899	4.176	4.222	4.110	4.197	4.042
Ni	-	0.012	-	0.000	-	-	-	-
V	0.002	-	-	0.004	0.004	0.001	0.002	0.006
ΣM	6.056	5.843	6.038	5.893	5.818	5.814	5.850	5.789
OH	3.508	3.548	3.505	3.998	3.999	3.998	4.000	3.999
F	0.492	0.452	0.495	-	-	-	-	-
Cl	-	0.001	-	0.002	0.001	0.002	-	0.001

Unidade	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a
Amostra	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-59	CQ-59	CQ-59	CQ-59
Grão	mica-51	mica-52	mica-53	mica-53	mica-54	mica-55	mica-56	mica-57
Posição	b	b	c	b	inclusao	inclusao	c	b
SiO ₂	39.20	38.38	38.95	39.65	36.15	36.26	37.94	36.70
TiO ₂	1.50	0.35	1.54	1.47	0.44	0.38	0.84	0.45
Al ₂ O ₃	7.90	4.16	7.83	7.92	0.46	0.99	6.70	0.62
FeO _T	17.08	21.62	17.64	17.58	33.48	32.27	23.09	33.32
Fe ₂ O ₃ *	5.95	10.55	6.30	6.06	14.96	14.30	7.27	15.34
FeO*	11.73	12.13	11.97	12.14	20.02	19.40	16.55	19.51
MnO	0.25	0.41	0.23	0.24	0.35	0.39	0.23	0.41
MgO	18.18	17.92	18.18	18.37	11.88	12.25	15.21	12.58
CaO	0.04	0.13	0.01	0.02	0.17	0.18	0.04	0.15
Na ₂ O	0.08	0.02	0.08	0.08	0.12	0.04	0.09	0.02
K ₂ O	11.44	11.35	11.06	11.28	10.31	10.80	11.39	11.04
BaO	-	-	0.01	-	0.04	-	-	0.02
H ₂ O*	3.97	3.84	3.90	4.01	3.59	3.61	3.85	3.67
Cr ₂ O ₃	-	0.00	0.00	-	0.01	0.01	0.00	0.01
V ₂ O ₃	0.04	0.03	0.06	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04
NiO	0.00	-	0.02	-	0.00	0.01	-	-
F	-	-	0.13	-	-	-	-	-
Cl	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.27	99.27	100.22	101.29	98.54	98.65	100.13	100.56
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	-	-	0.000	-	0.003	-	-	0.001
Ca	0.006	0.022	0.001	0.004	0.030	0.032	0.007	0.025
Na	0.022	0.007	0.025	0.024	0.037	0.014	0.026	0.005
K	2.203	2.261	2.134	2.150	2.195	2.287	2.266	2.300
ΣI	2.231	2.290	2.160	2.178	2.265	2.334	2.300	2.332
Si	5.918	5.994	5.887	5.924	6.029	6.020	5.916	5.994
^(IV) Al	1.405	0.765	1.395	1.395	0.091	0.193	1.231	0.120
^(IV) Fe ³⁺	0.676	1.240	0.717	0.681	1.878	1.786	0.853	1.885
ΣT	8.000	7.999	8.000	8.000	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.170	0.042	0.175	0.166	0.055	0.048	0.098	0.055
Cr	-	0.000	0.000	-	0.001	0.001	0.001	0.001
Fe ²⁺	1.481	1.584	1.513	1.516	2.793	2.694	2.159	2.665
Mn	0.032	0.054	0.030	0.031	0.050	0.055	0.030	0.057
Mg	4.091	4.173	4.097	4.092	2.955	3.031	3.536	3.063
Ni	0.000	-	0.002	-	0.000	0.002	-	-
V	0.005	0.003	0.007	0.004	0.005	0.003	0.002	0.005
ΣM	5.779	5.856	5.825	5.808	5.859	5.833	5.825	5.846
OH	4.000	3.998	3.934	3.998	3.999	3.999	3.999	3.999
F	-	-	0.064	-	-	-	-	-
Cl	0.000	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001

Unidade	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a
Amostra	CQ-59	CQ-59	CQ-59	CQ-59	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ97-139.2
Grão	mica-57	mica-57	mica-58	mica-58	mica-59	mica-60	mica-60	mica-61
Posição	c	b	b	c	b	c	b	c
SiO ₂	38.74	38.06	36.30	38.09	38.72	38.60	38.65	38.92
TiO ₂	2.16	0.64	0.57	0.88	1.26	1.70	1.46	1.33
Al ₂ O ₃	9.95	5.05	0.44	6.59	8.15	8.04	7.34	7.84
FeO _T	15.76	25.29	33.16	22.17	17.43	17.57	17.59	17.62
Fe ₂ O ₃ *	3.66	9.26	15.24	7.17	5.24	5.34	6.07	5.55
FeO*	12.46	16.96	19.44	15.72	12.71	12.76	12.12	12.63
MnO	0.18	0.28	0.40	0.23	0.19	0.19	0.23	0.21
MgO	17.40	14.96	12.09	15.53	17.94	17.39	17.61	17.92
CaO	-	0.03	0.20	0.02	0.04	0.03	0.01	0.06
Na ₂ O	0.04	0.01	0.04	0.04	0.20	0.17	0.14	0.12
K ₂ O	11.46	11.33	10.80	11.47	9.92	9.89	10.11	9.93
BaO	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	-	0.13	0.11
H ₂ O*	3.88	3.82	3.62	3.84	3.66	3.65	3.55	3.76
Cr ₂ O ₃	0.09	0.00	0.01	0.01	-	0.02	0.10	0.08
V ₂ O ₃	0.03	-	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	-
NiO	-	0.01	0.03	-	-	-	-	-
F	0.23	-	-	-	0.54	0.53	0.69	0.35
Cl	0.00	0.00	-	0.00	0.01	0.02	0.04	-
-O = (F,Cl) ₂	0.10	0.00	-	0.00	0.23	0.23	0.30	0.15
Total	100.22	100.43	99.22	99.64	98.44	98.15	98.02	98.64
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	-	0.008	0.006
Ca	-	0.006	0.036	0.004	0.006	0.005	0.001	0.010
Na	0.013	0.004	0.012	0.011	0.059	0.051	0.042	0.034
K	2.197	2.269	2.283	2.283	1.937	1.938	1.989	1.935
ΣI	2.211	2.279	2.331	2.299	2.005	1.994	2.040	1.986
Si	5.822	5.973	6.013	5.945	5.926	5.928	5.961	5.949
^(IV) Al	1.763	0.934	0.086	1.212	1.471	1.454	1.334	1.413
^(IV) Fe ³⁺	0.414	1.093	1.900	0.842	0.603	0.617	0.705	0.638
ΣT	8.000	7.999	7.999	7.999	8.000	8.000	8.000	8.000
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.244	0.076	0.071	0.103	0.144	0.196	0.169	0.153
Cr	0.010	0.000	0.002	0.001	-	0.002	0.012	0.009
Fe ²⁺	1.566	2.226	2.694	2.052	1.627	1.639	1.564	1.615
Mn	0.023	0.037	0.056	0.030	0.025	0.024	0.030	0.027
Mg	3.897	3.501	2.986	3.613	4.094	3.980	4.048	4.083
Ni	-	0.002	0.004	-	-	-	-	-
V	0.004	-	0.004	0.006	0.007	0.009	0.009	-
ΣM	5.744	5.842	5.817	5.806	5.897	5.850	5.832	5.887
OH	3.888	3.999	4.000	3.999	3.734	3.735	3.653	3.829
F	0.111	-	-	-	0.263	0.258	0.336	0.171
Cl	0.001	0.001	-	0.001	0.002	0.006	0.011	-

Unidade	C2a	C2a	C2a	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b
Amostra	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ-62	CQ-62	CQ-62	CQ-62	CQ-62
Grão	mica-61	mica-62	mica-62	mica-63	mica-63	mica-64	mica-65	mica-66
Posição	b	c	b	c	b	b	b	c
SiO ₂	38.88	39.12	38.16	38.25	38.13	37.53	38.20	37.85
TiO ₂	1.43	1.13	1.34	1.68	0.76	0.72	0.39	0.72
Al ₂ O ₃	7.60	7.69	7.35	5.09	3.22	1.28	-	2.82
FeO _T	17.36	17.99	18.27	23.30	26.20	27.63	27.13	23.03
Fe ₂ O ₃ *	5.85	5.24	6.47	9.61	11.66	14.06	15.67	12.44
FeO*	12.10	13.27	12.45	14.65	15.70	14.98	13.03	11.84
MnO	0.22	0.20	0.20	0.25	0.30	0.32	0.30	0.27
MgO	18.15	17.69	17.83	15.61	15.34	15.19	16.68	17.59
CaO	0.04	-	0.08	-	0.07	0.03	0.03	0.01
Na ₂ O	0.15	0.11	0.15	0.05	0.02	0.12	0.15	0.07
K ₂ O	9.66	9.74	9.79	11.21	11.16	11.02	11.10	11.13
BaO	0.01	0.09	0.01	-	0.02	0.00	0.03	0.00
H ₂ O*	3.70	3.70	3.71	3.86	3.64	3.72	3.75	3.79
Cr ₂ O ₃	0.04	0.02	0.01	0.01	-	0.00	0.01	-
V ₂ O ₃	-	-	0.02	0.05	0.03	0.01	0.00	0.02
NiO	0.09	0.01	0.03	-	0.01	-	0.02	0.01
F	0.45	0.42	0.34	-	0.34	-	-	-
Cl	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	-	0.01
-O = (F,Cl) ₂	0.19	0.18	0.15	0.00	0.14	0.00	-	0.00
Total	98.18	98.27	97.78	100.31	100.25	98.99	99.36	98.56
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.001	0.006	0.000	-	0.001	0.000	0.002	0.000
Ca	0.007	-	0.013	-	0.011	0.005	0.005	0.002
Na	0.044	0.032	0.044	0.015	0.006	0.036	0.047	0.022
K	1.887	1.906	1.933	2.222	2.246	2.267	2.265	2.247
ΣI	1.939	1.944	1.990	2.237	2.265	2.308	2.319	2.271
Si	5.954	6.003	5.906	5.944	6.016	6.050	6.112	5.991
^(IV) Al	1.372	1.391	1.341	0.932	0.599	0.244	-	0.526
^(IV) Fe ³⁺	0.674	0.605	0.753	1.124	1.385	1.705	1.887	1.482
ΣT	8.000	8.000	8.000	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.165	0.130	0.156	0.197	0.090	0.087	0.047	0.086
Cr	0.005	0.003	0.001	0.001	-	0.000	0.001	-
Fe ²⁺	1.549	1.703	1.611	1.904	2.072	2.020	1.744	1.567
Mn	0.029	0.025	0.026	0.033	0.039	0.043	0.040	0.036
Mg	4.143	4.047	4.113	3.616	3.609	3.651	3.979	4.151
Ni	0.011	0.001	0.004	-	0.001	-	0.002	0.001
V	-	-	0.002	0.006	0.003	0.002	0.000	0.003
ΣM	5.902	5.909	5.913	5.757	5.814	5.803	5.813	5.844
OH	3.781	3.791	3.831	4.000	3.828	3.998	4.000	3.997
F	0.218	0.205	0.165	-	0.171	-	-	-
Cl	0.001	0.004	0.004	0.000	0.001	0.002	-	0.003

Unidade	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b
Amostra	CQ-62	CQ-62	CQ-62	CQ-63	CQ-63	CQ-63	CQ-63	CQ-63
Grão	mica-66	mica-67	mica-67	mica-68	mica-68	mica-69	mica-69	mica-70
Posição	b	c	b	b	c	c	b	c
SiO ₂	37.89	38.09	37.71	37.51	37.24	36.56	35.85	36.44
TiO ₂	0.19	0.15	0.18	0.85	1.14	0.58	0.62	0.54
Al ₂ O ₃	0.36	0.23	0.18	2.00	2.12	0.42	0.30	0.12
FeO _T	25.00	25.62	25.74	29.03	29.40	32.90	32.95	33.89
Fe ₂ O ₃ *	15.86	16.06	16.21	13.42	13.35	15.42	15.22	15.59
FeO*	10.74	11.17	11.16	16.96	17.38	19.02	19.25	19.85
MnO	0.30	0.27	0.25	0.21	0.22	0.23	0.25	0.24
MgO	18.50	18.48	18.31	14.19	13.77	12.76	12.10	12.07
CaO	0.05	0.01	0.05	0.18	-	0.00	0.20	0.03
Na ₂ O	0.08	0.05	0.05	0.01	0.07	0.01	0.06	0.05
K ₂ O	11.16	11.14	11.04	11.07	10.95	10.93	10.31	10.83
BaO	0.01	0.03	0.03	0.00	0.01	-	0.01	-
H ₂ O*	3.77	3.78	3.61	3.74	3.73	3.65	3.57	3.62
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	-	0.00	0.00
V ₂ O ₃	0.01	0.01	-	0.04	0.02	0.04	-	0.06
NiO	-	-	0.02	0.01	0.00	-	0.01	-
F	-	-	0.31	-	-	-	-	-
Cl	0.00	0.00	0.00	0.01	-	0.00	0.00	0.00
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.00	0.13	0.00	-	0.00	0.00	0.00
Total	98.93	99.48	98.98	100.22	100.01	99.63	97.77	99.45
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.001	0.002	0.002	0.000	0.001	-	0.001	-
Ca	0.008	0.001	0.009	0.030	-	0.001	0.037	0.005
Na	0.026	0.017	0.014	0.004	0.021	0.002	0.019	0.016
K	2.266	2.253	2.247	2.260	2.245	2.293	2.207	2.287
ΣI	2.301	2.273	2.273	2.295	2.267	2.296	2.264	2.308
Si	6.032	6.039	6.018	6.005	5.983	6.010	6.016	6.033
^(IV) Al	0.067	0.043	0.034	0.378	0.401	0.081	0.060	0.023
^(IV) Fe ³⁺	1.899	1.917	1.947	1.616	1.615	1.908	1.922	1.943
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.023	0.018	0.021	0.103	0.137	0.072	0.079	0.068
Cr	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	-	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.429	1.481	1.489	2.271	2.335	2.616	2.702	2.749
Mn	0.040	0.036	0.034	0.029	0.031	0.032	0.035	0.034
Mg	4.390	4.368	4.356	3.387	3.297	3.128	3.027	2.979
Ni	-	-	0.003	0.001	0.000	-	0.002	-
V	0.002	0.002	-	0.006	0.003	0.005	-	0.007
ΣM	5.885	5.905	5.904	5.798	5.804	5.853	5.844	5.838
OH	3.999	4.000	3.844	3.997	4.000	3.999	3.999	3.999
F	-	-	0.155	-	-	-	-	-
Cl	0.001	0.000	0.001	0.003	-	0.001	0.001	0.001

Unidade	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b
Amostra	CQ-63	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1
Grão	mica-70	mica-71	mica-71	mica-72	mica-73	mica-73	mica-73	mica-74
Posição	b	c	b	b	c	c	b	c
SiO ₂	36.54	37.71	38.23	38.07	38.22	38.03	38.21	37.26
TiO ₂	0.57	2.66	2.15	2.22	1.47	1.93	1.30	2.25
Al ₂ O ₃	0.10	3.43	3.53	3.50	3.40	3.49	3.45	3.37
FeO _T	34.21	24.69	24.32	24.46	24.87	25.25	25.25	28.29
Fe ₂ O ₃ *	15.66	12.80	12.01	12.35	12.22	11.50	11.66	11.74
FeO*	20.12	13.18	13.51	13.34	13.87	14.90	14.76	17.73
MnO	0.25	0.33	0.26	0.20	0.25	0.27	0.29	0.34
MgO	12.00	16.04	16.21	16.36	16.74	15.27	16.08	13.03
CaO	0.02	-	-	0.05	0.03	0.01	0.04	-
Na ₂ O	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.09
K ₂ O	10.79	9.90	10.08	9.98	9.95	9.81	9.90	9.64
BaO	-	0.16	0.07	0.05	0.14	0.02	-	0.05
H ₂ O*	3.63	3.56	3.55	3.60	3.55	3.62	3.45	3.28
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	-	-	0.01	0.02	0.05	-
V ₂ O ₃	0.02	0.07	-	0.12	0.04	0.07	-	-
NiO	0.01	-	0.12	-	-	-	-	0.04
F	-	0.61	0.64	0.55	0.65	0.40	0.79	0.99
Cl	0.00	0.01	-	0.00	0.01	0.00	-	0.01
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.26	0.27	0.23	0.27	0.17	0.33	0.42
Total	99.79	100.24	100.10	100.17	100.28	99.22	99.69	99.38
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	-	0.010	0.004	0.003	0.009	0.001	-	0.003
Ca	0.004	-	-	0.008	0.004	0.001	0.006	-
Na	0.012	0.015	0.005	0.008	0.009	0.015	0.015	0.027
K	2.273	1.965	2.001	1.978	1.974	1.971	1.978	1.966
ΣI	2.289	1.990	2.010	1.996	1.996	1.988	1.999	1.996
Si	6.033	5.870	5.946	5.914	5.945	5.990	5.988	5.953
^(IV) Al	0.020	0.630	0.647	0.641	0.624	0.647	0.637	0.634
^(IV) Fe ³⁺	1.945	1.499	1.406	1.444	1.431	1.362	1.374	1.412
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.071	0.311	0.251	0.260	0.171	0.229	0.154	0.270
Cr	0.003	0.000	-	-	0.002	0.002	0.006	-
Fe ²⁺	2.779	1.715	1.758	1.734	1.804	1.963	1.935	2.369
Mn	0.035	0.043	0.034	0.026	0.033	0.036	0.038	0.045
Mg	2.955	3.721	3.758	3.789	3.881	3.585	3.757	3.104
Ni	0.002	-	0.015	-	-	-	-	0.005
V	0.002	0.009	-	0.014	0.005	0.009	-	-
ΣM	5.846	5.800	5.816	5.823	5.896	5.825	5.889	5.793
OH	4.000	3.701	3.686	3.728	3.680	3.798	3.609	3.496
F	-	0.298	0.314	0.272	0.317	0.201	0.391	0.500
Cl	0.000	0.001	-	0.001	0.002	0.001	-	0.003

Unidade	C2b	C2b	C2b	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a
Amostra	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51
Grão	mica-74	mica-75	mica-75	mica-76	mica-76	mica-77	mica-77	mica-78
Posição	b	c	b	c	b	b	c	c
SiO ₂	37.99	37.68	38.51	37.08	37.40	37.66	37.10	37.61
TiO ₂	2.21	1.70	0.05	2.73	1.57	1.91	2.80	2.78
Al ₂ O ₃	3.42	3.42	3.73	7.62	7.06	6.97	7.48	7.88
FeO _T	25.19	25.00	23.60	23.49	23.75	24.92	24.51	23.46
Fe ₂ O ₃ *	11.51	11.81	10.83	6.07	6.53	7.15	6.99	6.21
FeO*	14.84	14.38	13.85	18.03	17.87	18.48	18.22	17.87
MnO	0.30	0.30	0.24	0.31	0.33	0.39	0.38	0.30
MgO	14.97	15.91	17.70	12.27	13.42	13.09	12.43	12.92
CaO	0.05	0.02	0.08	0.00	0.02	-	-	-
Na ₂ O	0.02	0.04	0.05	0.06	0.01	0.04	0.02	0.03
K ₂ O	9.91	9.56	10.00	11.12	11.20	11.33	11.41	11.24
BaO	-	-	-	-	0.01	0.01	0.03	0.01
H ₂ O*	3.64	3.49	3.54	3.79	3.80	3.84	3.84	3.86
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
V ₂ O ₃	-	-	0.04	0.04	0.03	0.00	0.02	0.01
NiO	-	0.00	0.04	-	-	0.01	0.00	-
F	0.33	0.65	0.61	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	0.00	-	0.00	0.00	0.00
-O = (F,Cl) ₂	0.14	0.27	0.26	0.00	-	0.00	0.00	0.00
Total	99.05	98.69	99.01	99.12	99.25	100.91	100.72	100.74
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	-	-	-	-	0.001	0.001	0.002	0.001
Ca	0.009	0.003	0.014	0.000	0.004	-	-	-
Na	0.006	0.012	0.015	0.018	0.004	0.011	0.006	0.009
K	1.996	1.929	1.998	2.241	2.257	2.256	2.274	2.225
ΣI	2.010	1.943	2.027	2.259	2.265	2.268	2.282	2.234
Si	5.996	5.957	6.034	5.859	5.909	5.877	5.800	5.833
^(IV) Al	0.636	0.638	0.688	1.420	1.314	1.282	1.378	1.441
^(IV) Fe ³⁺	1.367	1.405	1.277	0.721	0.777	0.840	0.822	0.725
ΣT	7.999	7.999	7.999	8.000	8.000	7.999	7.999	8.000
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.262	0.202	0.005	0.324	0.186	0.224	0.330	0.324
Cr	-	-	-	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001
Fe ²⁺	1.958	1.901	1.815	2.383	2.361	2.412	2.382	2.318
Mn	0.040	0.040	0.032	0.041	0.044	0.051	0.050	0.039
Mg	3.522	3.749	4.134	2.891	3.160	3.045	2.897	2.988
Ni	-	0.001	0.005	-	-	0.002	0.001	-
V	-	-	0.005	0.005	0.004	0.000	0.002	0.002
ΣM	5.782	5.893	5.996	5.645	5.755	5.737	5.662	5.672
OH	3.837	3.675	3.697	3.999	4.000	4.000	4.000	3.999
F	0.163	0.325	0.303	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	0.001	-	0.000	0.000	0.001

Unidade	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a
Amostra	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ97-462.8
Grão	mica-78	mica-79	mica-79	mica-80	mica-80	mica-80	mica-80	mica-81
Posição	b	b	c	c	b	b	c	c
SiO ₂	38.13	37.55	37.40	37.45	37.44	37.19	37.46	36.81
TiO ₂	1.63	1.84	2.63	2.38	2.19	1.79	2.33	2.10
Al ₂ O ₃	6.85	7.50	7.50	7.16	6.84	6.53	7.54	6.23
FeO _T	23.33	24.05	23.91	24.00	24.72	24.72	24.00	24.03
Fe ₂ O ₃ *	6.91	6.05	5.99	6.62	6.78	7.27	6.23	7.61
FeO*	17.11	18.61	18.53	18.05	18.62	18.25	18.68	17.18
MnO	0.37	0.34	0.32	0.32	0.37	0.36	0.32	0.22
MgO	14.13	12.91	12.61	12.62	12.34	12.77	12.50	13.56
CaO	0.03	0.00	-	0.01	-	0.01	0.00	0.02
Na ₂ O	0.04	0.03	0.06	0.07	0.11	0.11	0.14	0.04
K ₂ O	11.19	11.18	9.82	11.24	11.07	11.20	10.99	9.57
BaO	0.06	0.03	0.02	0.00	-	0.01	-	0.08
H ₂ O*	3.85	3.82	3.80	3.81	3.79	3.78	3.82	3.58
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00
V ₂ O ₃	0.02	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.06	-
NiO	0.01	-	0.03	0.03	0.01	-	0.01	0.01
F	-	-	-	-	-	-	-	0.34
Cl	-	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00
-O = (F,Cl) ₂	-	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.14
Total	100.34	99.90	98.74	99.81	99.56	99.29	100.08	97.22
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.004	0.002	0.001	0.000	-	0.000	-	0.005
Ca	0.005	0.000	-	0.001	-	0.002	0.000	0.004
Na	0.012	0.011	0.017	0.022	0.032	0.035	0.044	0.012
K	2.222	2.240	1.975	2.256	2.232	2.269	2.197	1.958
ΣI	2.242	2.253	1.994	2.279	2.264	2.307	2.241	1.979
Si	5.934	5.897	5.896	5.889	5.918	5.907	5.872	5.904
^(IV) Al	1.257	1.388	1.393	1.327	1.275	1.223	1.393	1.178
^(IV) Fe ³⁺	0.809	0.715	0.711	0.783	0.806	0.869	0.735	0.918
ΣT	7.999	8.000	8.000	7.999	7.999	7.999	8.000	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.191	0.217	0.312	0.281	0.261	0.213	0.274	0.253
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	-	-	0.000	0.000
Fe ²⁺	2.227	2.444	2.443	2.373	2.461	2.424	2.449	2.305
Mn	0.049	0.045	0.042	0.042	0.049	0.048	0.043	0.030
Mg	3.279	3.023	2.965	2.958	2.907	3.024	2.921	3.242
Ni	0.001	-	0.004	0.003	0.001	-	0.001	0.002
V	0.003	0.005	0.005	0.006	0.002	0.004	0.008	-
ΣM	5.750	5.734	5.771	5.664	5.681	5.713	5.696	5.832
OH	4.000	3.999	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	3.827
F	-	-	-	-	-	-	-	0.172
Cl	-	0.001	-	-	0.000	0.000	0.000	0.001

Unidade	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b
Amostra	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75
Grão	mica-82	mica-83	mica-84	mica-84	mica-85	mica-85	mica-86	mica-86
Posição	c	b	b	c	c	b	b	c
SiO ₂	37.14	37.21	36.93	37.39	37.32	37.51	37.31	37.24
TiO ₂	2.71	1.99	3.06	3.03	2.25	1.99	2.41	2.96
Al ₂ O ₃	7.54	6.68	7.60	7.62	7.15	6.75	7.20	7.67
FeO _T	24.03	25.10	24.83	24.23	25.56	25.46	24.73	24.93
Fe ₂ O ₃ *	6.47	7.50	6.80	6.46	6.94	7.42	7.07	6.54
FeO*	18.21	18.35	18.71	18.41	19.32	18.78	18.37	19.05
MnO	0.39	0.41	0.36	0.36	0.40	0.40	0.37	0.35
MgO	12.45	12.94	11.95	12.08	12.26	12.85	12.69	11.83
CaO	0.02	-	0.02	-	0.00	-	-	-
Na ₂ O	0.08	0.02	0.04	0.05	0.04	0.00	0.05	0.04
K ₂ O	10.79	11.05	11.05	11.13	10.94	11.04	11.25	11.19
BaO	0.03	0.01	-	0.04	0.08	0.01	-	0.04
H ₂ O*	3.81	3.80	3.82	3.84	3.82	3.83	3.83	3.84
Cr ₂ O ₃	0.01	-	-	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
V ₂ O ₃	0.05	-	0.03	0.07	0.06	0.04	0.03	0.04
NiO	-	0.01	-	0.03	-	-	-	0.02
F	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.71	99.97	100.36	100.52	100.58	100.62	100.57	100.82
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.002	0.001	-	0.002	0.005	0.001	-	0.002
Ca	0.004	-	0.003	-	0.001	-	-	-
Na	0.025	0.006	0.013	0.014	0.012	0.000	0.014	0.012
K	2.163	2.222	2.211	2.218	2.191	2.208	2.245	2.231
ΣI	2.193	2.229	2.226	2.235	2.208	2.209	2.259	2.246
Si	5.838	5.867	5.792	5.838	5.858	5.878	5.838	5.819
^(IV) Al	1.397	1.242	1.405	1.402	1.322	1.246	1.329	1.412
^(IV) Fe ³⁺	0.765	0.890	0.802	0.759	0.819	0.875	0.833	0.769
ΣT	8.000	7.999	7.999	8.000	7.999	7.999	7.999	8.000
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.321	0.236	0.361	0.356	0.266	0.235	0.284	0.348
Cr	0.002	-	-	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Fe ²⁺	2.394	2.420	2.454	2.405	2.536	2.462	2.404	2.489
Mn	0.052	0.054	0.048	0.048	0.053	0.053	0.049	0.047
Mg	2.916	3.042	2.793	2.812	2.868	3.002	2.960	2.756
Ni	-	0.001	-	0.004	-	-	-	0.002
V	0.006	-	0.004	0.009	0.007	0.005	0.004	0.006
ΣM	5.690	5.753	5.660	5.634	5.730	5.756	5.701	5.648
OH	3.999	3.998	3.999	4.000	3.998	4.000	3.999	3.998
F	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	0.001	0.002	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.002

Unidade	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b
Amostra	CQ-75	CQ-75	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CQ97-436.7
Grão	mica-87	mica-87	mica-88	mica-88	mica-89	mica-89	mica-90	mica-91
Posição	b	c	c	b	c	b	b	c
SiO ₂	37.11	37.05	37.36	37.32	36.86	36.81	37.68	36.98
TiO ₂	1.93	2.18	1.58	2.29	2.05	1.67	1.88	3.11
Al ₂ O ₃	6.79	6.87	5.86	6.02	5.64	5.75	6.66	7.28
FeO _T	24.88	24.46	24.55	24.42	24.78	25.21	23.37	21.61
Fe ₂ O ₃ *	7.46	7.07	7.39	8.07	8.53	8.21	6.59	6.40
FeO*	18.17	18.10	17.90	17.16	17.10	17.83	17.44	15.85
MnO	0.40	0.40	0.42	0.52	0.51	0.49	0.49	0.34
MgO	13.06	12.75	13.22	13.33	13.41	13.25	13.60	13.38
CaO	-	-	0.00	0.06	0.04	0.07	0.01	-
Na ₂ O	0.05	0.02	0.06	0.02	0.08	0.06	-	0.02
K ₂ O	11.08	10.83	9.59	9.86	9.71	9.70	9.79	9.97
BaO	-	-	0.04	-	0.17	0.07	0.05	0.04
H ₂ O*	3.80	3.78	3.35	3.52	3.61	3.53	3.44	3.45
Cr ₂ O ₃	-	-	0.09	0.00	0.02	0.05	-	-
V ₂ O ₃	0.05	0.06	0.02	0.06	-	-	-	0.03
NiO	0.03	0.00	-	0.09	0.01	0.01	-	-
F	-	-	0.81	0.57	0.28	0.43	0.73	0.69
Cl	0.00	0.00	0.02	-	0.00	-	0.01	0.00
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.00	0.35	0.24	0.12	0.18	0.31	0.29
Total	99.93	99.13	97.38	98.66	97.90	97.74	98.04	97.25
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	-	-	0.003	-	0.011	0.004	0.003	0.003
Ca	-	-	0.001	0.010	0.006	0.012	0.002	-
Na	0.015	0.007	0.020	0.006	0.024	0.018	-	0.006
K	2.229	2.191	1.964	1.994	1.985	1.990	1.979	2.020
ΣI	2.245	2.198	1.987	2.010	2.027	2.025	1.985	2.029
Si	5.852	5.873	5.998	5.913	5.906	5.918	5.971	5.872
^(IV) Al	1.262	1.283	1.109	1.124	1.064	1.089	1.243	1.363
^(IV) Fe ³⁺	0.886	0.843	0.892	0.962	1.029	0.993	0.786	0.765
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	8.000
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.230	0.260	0.190	0.273	0.247	0.202	0.224	0.371
Cr	-	-	0.012	0.000	0.003	0.006	-	-
Fe ²⁺	2.396	2.400	2.404	2.274	2.292	2.397	2.311	2.105
Mn	0.053	0.054	0.058	0.070	0.069	0.067	0.065	0.046
Mg	3.069	3.013	3.164	3.149	3.203	3.176	3.214	3.168
Ni	0.004	0.000	-	0.012	0.001	0.001	-	-
V	0.006	0.008	0.002	0.007	-	-	-	0.004
ΣM	5.757	5.736	5.830	5.786	5.814	5.849	5.814	5.693
OH	3.999	3.999	3.584	3.716	3.858	3.783	3.633	3.652
F	-	-	0.410	0.284	0.141	0.217	0.366	0.348
Cl	0.001	0.001	0.006	-	0.000	-	0.002	0.001

Unidade	B3b	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Amostra	CQ97-436.7	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9
Grão	mica-91	mica-92	mica-93	mica-93	mica-94	mica-94	mica-95	mica-95
Posição	b	b	c	b	c	b	b	c
SiO ₂	36.96	35.99	36.32	35.85	36.18	36.27	35.62	36.21
TiO ₂	2.19	2.26	2.04	1.81	2.32	2.29	2.33	1.97
Al ₂ O ₃	6.93	5.47	5.69	6.07	6.11	6.25	5.97	5.66
FeO _T	23.09	28.16	27.70	27.43	26.91	26.99	27.48	26.97
Fe ₂ O ₃ *	6.87	8.83	8.25	7.95	7.84	7.84	8.50	8.27
FeO*	16.91	20.22	20.27	20.28	19.85	19.93	19.84	19.53
MnO	0.57	0.34	0.31	0.34	0.45	0.42	0.40	0.55
MgO	13.54	11.09	11.42	11.39	11.26	11.51	11.32	11.52
CaO	0.04	0.06	0.05	0.07	0.05	0.06	0.07	0.03
Na ₂ O	0.03	0.04	0.03	0.02	0.05	0.03	0.06	-
K ₂ O	9.77	9.74	9.45	9.57	9.75	9.59	9.52	9.97
BaO	0.11	0.01	0.16	0.05	-	0.13	0.11	0.03
H ₂ O*	3.31	3.42	3.58	3.50	3.36	3.58	3.53	3.42
Cr ₂ O ₃	0.04	0.01	0.05	0.15	0.05	0.02	0.07	0.07
V ₂ O ₃	-	0.09	0.07	0.14	0.00	0.04	0.07	0.06
NiO	0.00	0.00	-	-	0.03	0.04	-	-
F	0.96	0.54	0.22	0.36	0.70	0.27	0.29	0.55
Cl	0.01	-	0.04	-	0.01	0.03	0.04	-
-O = (F,Cl) ₂	0.41	0.23	0.10	0.15	0.30	0.12	0.13	0.23
Total	97.82	97.89	97.85	97.41	97.71	98.18	97.60	97.59
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)								
Ba	0.007	0.001	0.010	0.003	-	0.008	0.007	0.002
Ca	0.006	0.011	0.009	0.012	0.008	0.010	0.011	0.005
Na	0.008	0.013	0.009	0.006	0.017	0.010	0.019	-
K	1.982	2.025	1.959	1.994	2.019	1.977	1.981	2.071
ΣI	2.003	2.050	1.987	2.015	2.044	2.004	2.019	2.078
Si	5.878	5.866	5.901	5.854	5.873	5.858	5.809	5.899
^(IV) Al	1.300	1.051	1.090	1.168	1.168	1.189	1.147	1.086
^(IV) Fe ³⁺	0.822	1.083	1.009	0.977	0.958	0.953	1.043	1.014
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.263	0.278	0.249	0.222	0.283	0.278	0.286	0.241
Cr	0.005	0.001	0.006	0.019	0.007	0.003	0.009	0.009
Fe ²⁺	2.249	2.756	2.754	2.770	2.696	2.692	2.706	2.661
Mn	0.076	0.047	0.043	0.047	0.061	0.057	0.056	0.076
Mg	3.210	2.695	2.767	2.773	2.726	2.771	2.753	2.797
Ni	0.000	0.000	-	-	0.004	0.005	-	-
V	-	0.011	0.009	0.019	0.000	0.005	0.009	0.008
ΣM	5.803	5.787	5.828	5.850	5.777	5.812	5.820	5.791
OH	3.514	3.722	3.877	3.813	3.640	3.852	3.841	3.716
F	0.483	0.278	0.111	0.187	0.358	0.140	0.148	0.284
Cl	0.003	-	0.011	-	0.002	0.008	0.011	-

Unidade	C3	C3	C3	C3
Amostra	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-413.1
Grão	mica-95	mica-96	mica-97	mica-98
Posição	b	c	c	b
SiO ₂	35.97	36.33	36.39	35.90
TiO ₂	2.28	3.25	2.48	2.12
Al ₂ O ₃	5.66	6.52	6.15	4.86
FeO _T	26.91	25.85	26.45	27.30
Fe ₂ O ₃ *	8.67	7.47	7.36	9.54
FeO*	19.11	19.12	19.82	18.71
MnO	0.34	0.42	0.34	0.60
MgO	11.84	10.98	11.13	11.76
CaO	0.04	0.04	0.01	0.02
Na ₂ O	0.06	0.04	0.05	0.06
K ₂ O	9.71	9.89	9.79	9.62
BaO	0.03	-	-	-
H ₂ O*	3.44	3.67	3.55	3.32
Cr ₂ O ₃	0.03	0.06	0.01	0.04
V ₂ O ₃	-	0.04	-	0.07
NiO	-	-	-	0.03
F	0.52	0.11	0.28	0.72
Cl	-	0.00	0.01	-
-O = (F,Cl) ₂	0.22	0.05	0.12	0.30
Total	97.48	97.88	97.25	97.07
Fórmula estrutural com base em 24 oxigênios (OH, F, Cl)				
Ba	0.002	-	-	-
Ca	0.007	0.007	0.001	0.004
Na	0.019	0.012	0.016	0.020
K	2.015	2.033	2.030	2.011
ΣI	2.042	2.052	2.048	2.036
Si	5.852	5.855	5.919	5.885
^(IV) Al	1.086	1.238	1.179	0.938
^(IV) Fe ³⁺	1.061	0.907	0.901	1.177
ΣT	7.999	7.999	7.999	7.999
^(VI) Al	-	-	-	-
Ti	0.279	0.393	0.303	0.262
Cr	0.004	0.008	0.001	0.005
Fe ²⁺	2.600	2.578	2.696	2.565
Mn	0.047	0.057	0.047	0.083
Mg	2.871	2.637	2.699	2.874
Ni	-	-	-	0.004
V	-	0.006	-	0.010
ΣM	5.802	5.679	5.745	5.803
OH	3.732	3.941	3.851	3.627
F	0.268	0.058	0.146	0.373
Cl	-	0.001	0.003	-

Tabela D. Análises de carbonatos em Catalão II.

Litho	B1	B1	B2a	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP
Amostra	CQ-01	MP-RM15-213.7	CQ-08	CQ-54	CQ-54	CQ-57	CQ-57	CTII4-293.9
Grão	cal-1	cal-2	cal-3	cal-4	cal-5	cal-6	cal-7	cal-8
CaO	54.47	55.12	52.71	53.87	55.15	53.53	54.96	57.74
MgO	0.02	0.02	0.01	0.28	0.15	0.22	0.06	0.15
FeO	0.14	0.07	-	0.26	0.26	0.23	0.25	0.18
MnO	0.03	-	0.04	0.10	0.16	0.17	0.17	0.23
SrO	0.58	0.26	0.31	1.08	0.76	1.04	0.12	-
BaO	0.39	1.42	0.38	0.22	0.05	0.31	-	-
CO ₂	43.23	43.84	41.64	43.32	44.04	43.03	43.51	45.72
Total	98.86	100.72	95.09	99.13	100.56	98.53	99.07	104.02
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Ca	1.977	1.972	1.987	1.952	1.966	1.953	1.983	1.982
Mg	0.001	0.002	0.001	0.014	0.007	0.011	0.003	0.007
Fe	0.004	0.007	-	0.007	0.007	0.006	0.007	0.005
Mn	0.001	0.005	0.001	0.003	0.005	0.005	0.005	0.006
Sr	0.011	0.007	0.006	0.021	0.015	0.021	0.002	-
Ba	0.005	0.007	0.005	0.003	0.001	0.004	-	-
Total	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
% CaCO ₃	99.7	99.9	99.9	98.8	99.0	98.9	99.2	99.1
% MgCO ₃	0.1	0.0	0.0	0.7	0.4	0.6	0.2	0.4
% FeCO ₃	0.2	0.1	-	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2

Litho	FLAP	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a
Amostra	CTII4-293.9	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ97-139.2	CQ-59
Grão	cal-9	cal-10	cal-11	cal-12	cal-13	cal-14	cal-15	cal-16
CaO	59.35	54.71	54.10	54.39	57.26	57.29	57.25	54.66
MgO	0.12	0.03	0.02	0.08	0.25	0.18	0.24	0.03
FeO	0.13	0.08	0.01	0.09	0.18	0.09	0.14	0.07
MnO	0.13	0.08	0.07	0.12	0.17	0.18	0.21	0.10
SrO	-	1.30	1.19	1.14	0.67	0.96	0.99	1.21
BaO	0.11	0.09	0.12	0.24	0.23	0.32	0.26	0.22
CO ₂	46.90	43.65	43.06	43.45	45.78	45.82	45.91	43.61
Total	106.73	99.94	98.57	99.51	104.53	104.84	105.00	99.90
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Ca	1.986	1.967	1.972	1.964	1.963	1.963	1.957	1.967
Mg	0.005	0.002	0.001	0.004	0.012	0.009	0.012	0.002
Fe	0.003	0.002	0.000	0.002	0.005	0.002	0.004	0.002
Mn	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.003
Sr	-	0.025	0.024	0.022	0.012	0.018	0.018	0.024
Ba	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003
Total	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
% CaCO ₃	99.4	99.7	99.8	99.5	98.9	99.2	98.9	99.7
% MgCO ₃	0.3	0.1	0.0	0.2	0.6	0.4	0.6	0.1
% FeCO ₃	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1

Litho	C2a	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b	C2b
Amostra	CQ-59	CQ-62	CQ-62	CQ-62	CQ-63	CQ-63	CTII4-408.1	CTII4-408.1
Grão	cal-17	cal-18	cal-19	cal-20	cal-21	cal-22	cal-23	cal-24
CaO	54.21	54.52	54.01	53.09	53.51	52.72	55.07	56.21
MgO	0.01	0.19	0.10	0.12	0.22	0.38	0.18	0.17
FeO	0.05	0.11	0.10	0.17	0.32	0.11	0.16	0.11
MnO	0.06	0.15	0.09	0.11	0.10	0.11	0.30	0.25
SrO	1.26	0.52	1.43	1.56	1.51	1.72	1.06	1.07
BaO	0.29	-	0.31	0.15	0.27	0.18	0.37	0.42
CO ₂	43.24	43.37	43.30	42.67	43.21	42.71	44.25	45.09
Total	99.11	98.85	99.34	97.86	99.15	97.92	101.38	103.31
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Ca	1.968	1.973	1.958	1.953	1.944	1.937	1.953	1.957
Mg	0.000	0.009	0.005	0.006	0.011	0.020	0.009	0.008
Fe	0.001	0.003	0.003	0.005	0.009	0.003	0.005	0.003
Mn	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.008	0.007
Sr	0.025	0.010	0.028	0.031	0.030	0.034	0.020	0.020
Ba	0.004	-	0.004	0.002	0.004	0.002	0.005	0.005
Total	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
% CaCO ₃	99.8	99.2	99.5	99.3	98.8	98.7	98.9	99.1
% MgCO ₃	0.0	0.5	0.2	0.3	0.6	1.0	0.4	0.4
% FeCO ₃	0.1	0.2	0.1	0.3	0.5	0.2	0.2	0.1

Litho	C2b	C2b	C2b	B3a	B3a	B3a	B3a	B3a
Amostra	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CTII4-408.1	CQ-51	CQ-51	CQ-51	CQ97-462.8	CQ97-462.8
Grão	cal-25	cal-26	cal-27	cal-28	cal-29	cal-30	cal-31	cal-32
CaO	55.21	58.00	57.15	53.92	53.68	53.80	58.83	59.06
MgO	0.22	0.19	0.24	0.02	0.15	0.06	0.10	0.09
FeO	0.15	0.18	0.14	0.04	0.16	0.12	0.06	0.11
MnO	0.16	0.30	0.19	0.08	0.18	0.04	0.25	0.03
SrO	1.08	0.93	0.91	1.40	1.56	1.40	0.58	0.50
BaO	0.40	0.46	0.52	0.35	0.14	0.28	0.60	0.59
CO ₂	44.32	46.55	45.86	43.12	43.20	43.06	46.89	46.91
Total	101.53	106.61	105.01	98.95	99.08	98.77	107.32	107.29
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios								
Ca	1.955	1.956	1.956	1.963	1.950	1.961	1.969	1.976
Mg	0.011	0.009	0.011	0.001	0.008	0.003	0.005	0.004
Fe	0.004	0.005	0.004	0.001	0.005	0.003	0.002	0.003
Mn	0.004	0.008	0.005	0.002	0.005	0.001	0.007	0.001
Sr	0.021	0.017	0.017	0.028	0.031	0.028	0.010	0.009
Ba	0.005	0.006	0.007	0.005	0.002	0.004	0.007	0.007
Total	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
% CaCO ₃	99.0	98.9	99.0	99.8	99.1	99.6	99.3	99.6
% MgCO ₃	0.5	0.5	0.6	0.1	0.4	0.2	0.2	0.2
% FeCO ₃	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1

Litho	B3a	B3b	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Amostra	CQ97-462.8	CQ97-436.7	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-184.9	CTII4-413.1	CTII4-413.1	CTII4-413.1
Grão	cal-33	cal-34	cal-35	cal-36	cal-37	cal-38	cal-39	cal-40	cal-41
CaO	58.86	58.18	56.10	57.54	58.39	57.39	58.80	57.84	59.30
MgO	0.08	0.04	0.06	0.08	0.07	0.04	0.05	0.05	0.04
FeO	0.18	0.28	0.13	0.11	0.10	0.05	0.09	0.08	0.06
MnO	0.08	0.17	0.06	0.25	0.14	0.10	0.11	0.12	0.09
SrO	0.78	0.39	1.13	1.13	1.11	1.06	1.17	1.31	1.12
BaO	0.56	0.53	0.46	0.53	0.53	0.64	0.47	0.65	0.86
CO ₂	46.92	46.30	44.82	46.10	46.67	45.80	46.95	46.31	47.39
Total	107.45	105.89	102.75	105.75	107.01	105.08	107.65	106.35	108.85
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios									
Ca	1.969	1.974	1.965	1.959	1.964	1.967	1.966	1.960	1.964
Mg	0.003	0.001	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
Fe	0.005	0.002	0.003	0.003	0.003	0.001	0.002	0.002	0.001
Mn	0.002	-	0.002	0.007	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002
Sr	0.014	0.005	0.021	0.021	0.020	0.020	0.021	0.024	0.020
Ba	0.007	0.019	0.006	0.007	0.007	0.008	0.006	0.008	0.010
Total	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
% CaCO ₃	99.5	99.3	99.6	99.3	99.5	99.7	99.6	99.6	99.7
% MgCO ₃	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
% FeCO ₃	0.2	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Litho	FLAP	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a
Amostra	CQ-54	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-58	CQ-58
Grão	mag-64	mag-65	mag-66	mag-67	mag-68	mag-69	mag-70
SiO ₂	-	0.04	0.03	0.19	0.01	0.01	0.04
TiO ₂	0.60	1.84	0.80	-	0.01	0.71	0.85
Al ₂ O ₃	-	-	0.01	-	0.00	-	-
FeO _T	92.73	91.49	93.29	65.58	60.35	92.25	91.95
Fe ₂ O ₃ *	67.63	65.67	68.06	48.34	44.80	67.53	67.11
FeO *	31.88	32.41	32.05	22.09	20.04	31.49	31.56
MnO	0.05	0.57	0.20	0.01	-	0.29	0.32
MgO	0.03	0.14	0.08	0.01	0.04	0.10	0.11
CaO	0.01	0.02	0.04	0.03	0.02	0.06	0.05
Cr ₂ O ₃	0.12	0.09	0.10	0.02	0.03	0.17	0.18
V ₂ O ₃	0.95	0.69	0.67	0.01	-	0.60	0.61
ZnO	0.01	-	0.06	0.06	0.02	-	0.06
NiO	-	0.07	-	0.01	0.05	0.01	-
Total	101.29	101.55	102.10	70.76	65.03	100.99	100.90

Fórmula estrutural com base em 4 oxigênios

[illegible]

Tabela F. Análises de ilmenita em Catalão II. *Valores calculados com base em critérios estequiométricos.

Lítho	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a
Amostra	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-04
Grão	ilm-1	ilm-2	ilm-3	ilm-4	ilm-5	ilm-6	ilm-7
SiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00
TiO ₂	48.99	48.57	49.21	49.15	49.78	48.93	50.20
Al ₂ O ₃	-	0.01	-	-	-	-	0.01
FeO _T	46.75	46.86	46.20	45.64	45.83	46.70	45.73
Fe ₂ O ₃ *	8.07	8.56	7.30	6.71	6.43	7.77	5.96
FeO *	39.49	39.16	39.63	39.60	40.05	39.71	40.37
MnO	1.76	1.68	1.78	1.82	1.90	1.81	1.95
MgO	1.54	1.53	1.58	1.53	1.50	1.37	1.46
CaO	0.00	-	0.01	0.05	0.08	-	0.09
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
V ₂ O ₃	0.30	0.38	0.30	0.31	0.29	0.35	0.35
ZnO	0.02	0.09	0.01	-	0.05	0.04	0.10
NiO	0.03	0.03	0.01	-	0.00	0.02	-
Total	99.42	99.17	99.12	98.53	99.46	99.27	99.90
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios							
Si	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
Ti	0.921	0.915	0.928	0.932	0.936	0.922	0.940
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
V	0.006	0.008	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007
Al	-	0.000	-	-	-	-	0.000
Fe ³⁺	0.152	0.161	0.138	0.127	0.121	0.146	0.112
ΣB	1.079	1.085	1.072	1.067	1.063	1.077	1.060
Mg	0.058	0.057	0.059	0.058	0.056	0.051	0.054
Fe ²⁺	0.825	0.820	0.831	0.835	0.837	0.832	0.841
Mn	0.037	0.036	0.038	0.039	0.040	0.038	0.041
Ni	0.001	0.001	0.000	-	0.000	0.000	-
Zn	0.000	0.002	0.000	-	0.001	0.001	0.002
Ca	0.000	-	0.000	0.001	0.002	-	0.002
ΣA	0.921	0.915	0.928	0.933	0.937	0.923	0.940

Litho	B2a	B2a	B2a	B2a	B2a	C2b	C2b
Amostra	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-04	CQ-62	CQ-62
Grão	ilm-8	ilm-9	ilm-10	ilm-11	ilm-12	ilm-13	ilm-14
SiO ₂	0.03	-	-	0.01	0.02	0.03	0.26
TiO ₂	49.70	50.24	49.91	50.12	49.94	50.35	50.15
Al ₂ O ₃	-	-	-	0.00	-	0.02	0.00
FeO _T	45.42	44.82	45.07	44.75	45.26	44.36	45.14
Fe ₂ O ₃ [*]	5.97	4.83	5.82	5.29	5.55	3.41	3.41
FeO [*]	40.05	40.47	39.83	39.99	40.27	41.30	42.07
MnO	2.00	2.08	2.20	2.32	2.12	3.10	2.88
MgO	1.38	1.35	1.34	1.33	1.33	0.30	0.17
CaO	0.09	0.16	0.31	0.25	0.12	0.27	0.06
Cr ₂ O ₃	0.00	-	-	0.02	0.03	0.04	0.03
V ₂ O ₃	0.30	0.32	0.30	0.29	0.29	0.53	0.51
ZnO	0.09	-	0.05	0.05	-	0.00	0.06
NiO	0.00	0.01	-	0.02	0.00	0.01	-
Total	99.02	98.98	99.17	99.16	99.11	99.02	99.27
Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios							
Si	0.001	-	-	0.000	0.000	0.001	0.007
Ti	0.940	0.951	0.942	0.947	0.944	0.961	0.955
Cr	0.000	-	-	0.000	0.001	0.001	0.001
V	0.006	0.007	0.006	0.006	0.006	0.011	0.010
Al	-	-	-	0.000	-	0.001	0.000
Fe3+	0.113	0.091	0.110	0.100	0.105	0.065	0.065
ΣB	1.060	1.049	1.058	1.053	1.056	1.039	1.038
Mg	0.052	0.050	0.050	0.050	0.050	0.011	0.006
Fe2+	0.842	0.852	0.836	0.840	0.846	0.876	0.891
Mn	0.043	0.044	0.047	0.049	0.045	0.067	0.062
Ni	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.000	-
Zn	0.002	-	0.001	0.001	-	0.000	0.001
Ca	0.003	0.004	0.008	0.007	0.003	0.007	0.002
ΣA	0.940	0.951	0.942	0.947	0.944	0.961	0.962

Litho	C2b	C2b	C2b
Amostra	CQ-62	CQ-62	CQ-63
Grão	ilm-15	ilm-16	ilm-17
SiO ₂	0.79	0.04	0.01
TiO ₂	49.45	50.46	49.63
Al ₂ O ₃	0.00	0.01	0.02
FeO _T	44.09	45.04	47.28
Fe ₂ O ₃ [*]	2.26	3.38	5.80
FeO [*]	42.06	42.00	42.06
MnO	2.57	2.93	1.95
MgO	0.31	0.19	0.32
CaO	0.14	0.10	0.00
Cr ₂ O ₃	0.02	0.05	0.05
V ₂ O ₃	0.51	0.51	0.47
ZnO	-	-	-
NiO	0.04	-	0.06
Total	97.92	99.32	99.78

Fórmula estrutural com base em 6 oxigênios

Si	0.020	0.001	0.000
Ti	0.953	0.961	0.939
Cr	0.000	0.001	0.001
V	0.010	0.010	0.009
Al	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.044	0.064	0.110
ΣB	1.027	1.038	1.060
Mg	0.012	0.007	0.012
Fe ²⁺	0.901	0.889	0.885
Mn	0.056	0.063	0.041
Ni	0.001	-	0.001
Zn	-	-	-
Ca	0.004	0.003	0.000
ΣA	0.973	0.962	0.940

Tabela G. Análises de titanita em Catalão II.

Litho	B1	B1	B1	B1	B1	B2b	B2b	B2b
Amostra	CTII4-444.6	CTII4-444.6	CTII4-444.6	CTII4-444.6	CTII4-444.6	CQ-04	CQ-04	CQ-04
Grão	ttn-1	ttn-2	ttn-3	ttn-4	ttn-5	ttn-6	ttn-7	ttn-8
SiO ₂	30.10	30.13	30.11	29.78	29.64	29.42	29.76	29.83
TiO ₂	34.69	34.56	34.74	34.02	34.14	36.04	36.11	35.43
Al ₂ O ₃	0.09	0.07	0.07	0.13	0.15	0.07	0.05	0.11
Fe ₂ O ₃	2.03	1.99	1.98	2.02	2.18	1.65	1.52	1.43
MnO	0.05	0.04	0.01	0.04	0.03	0.02	-	0.02
MgO	-	-	-	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
CaO	28.48	28.47	28.59	28.20	28.30	28.26	28.38	28.74
Na ₂ O	0.18	0.26	0.26	0.25	0.24	0.14	0.16	0.10
ZrO ₂	0.78	0.73	0.76	1.00	0.92	0.72	0.86	1.77
Nb ₂ O ₅	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
SrO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
La ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ce ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nd ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
F	-	-	0.29	0.12	0.63	-	-	-
Cl	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.01	-	-
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.00	0.12	0.05	0.27	0.00	-	-
Total	96.94	96.82	97.23	96.01	96.52	96.97	97.44	98.06
Fórmula estrutural com base em 20 oxigênios								
Ca	4.155	4.159	4.153	4.155	4.141	4.125	4.118	4.160
Na	0.049	0.069	0.068	0.066	0.063	0.036	0.041	0.027
Mn	0.006	0.005	0.001	0.004	0.004	0.002	-	0.002
Mg	-	-	-	0.005	0.003	0.007	0.004	0.003
Sr	-	-	-	-	-	-	-	-
La	-	-	-	-	-	-	-	-
Ce	-	-	-	-	-	-	-	-
Nd	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	3.553	3.545	3.543	3.519	3.508	3.693	3.679	3.600
Al	0.014	0.011	0.011	0.022	0.024	0.012	0.008	0.018
Fe ³⁺	0.208	0.204	0.202	0.209	0.224	0.169	0.155	0.145
Zr	0.052	0.048	0.050	0.067	0.061	0.048	0.057	0.117
Nb								
Si	4.098	4.108	4.082	4.096	4.048	4.007	4.030	4.030
F	-	-	0.125	0.054	0.274	-	-	-
Cl	0.001	0.001	-	0.001	0.000	0.001	-	-
Total	12.189	12.203	12.291	12.244	12.404	12.170	12.152	12.161

Litho Amostra	B2b CQ-04 ttn-9	B2b CQ-04 ttn-10	B2b CQ-04 ttn-11	B2b CQ-04 ttn-12	B2b CQ-04 ttn-13	C2a CQ-59 ttn-14	C2a CQ-59 ttn-15	C2a CQ-59 ttn-16
SiO ₂	30.24	30.02	29.64	30.05	29.90	29.66	29.68	29.71
TiO ₂	37.25	35.76	35.18	36.68	36.43	33.69	33.99	35.37
Al ₂ O ₃	0.02	0.11	0.17	0.06	0.05	0.11	0.09	0.05
Fe ₂ O ₃	1.45	1.44	1.54	1.17	1.35	2.05	2.00	2.36
MnO	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02
MgO	0.00	-	0.03	0.00	0.02	-	0.02	0.01
CaO	28.68	28.82	29.07	28.91	28.74	28.37	28.46	28.90
Na ₂ O	0.19	0.08	0.07	0.15	0.10	0.17	0.11	0.13
ZrO ₂	0.57	1.92	2.70	1.05	1.08	1.60	2.04	0.70
Nb ₂ O ₅	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
SrO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
La ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ce ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nd ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
F	0.47	-	-	-	-	-	0.28	-
Cl	0.00	0.00	-	-	0.01	0.00	0.01	-
-O = (F,Cl) ₂	0.20	0.00	-	-	0.00	0.00	0.12	-
Total	99.19	98.74	98.94	98.55	98.15	96.30	97.18	97.76
Fórmula estrutural com base em 20 oxigênios								
Ca	4.072	4.142	4.189	4.147	4.143	4.182	4.159	4.192
Na	0.050	0.021	0.019	0.040	0.027	0.046	0.029	0.033
Mn	0.002	0.004	0.003	0.004	0.002	0.002	0.003	0.003
Mg	0.001	-	0.006	0.001	0.004	-	0.003	0.001
Sr	-	-	-	-	-	-	-	-
La	-	-	-	-	-	-	-	-
Ce	-	-	-	-	-	-	-	-
Nd	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	3.714	3.608	3.560	3.694	3.686	3.488	3.488	3.602
Al	0.003	0.018	0.027	0.010	0.008	0.018	0.014	0.009
Fe ³⁺	0.144	0.145	0.156	0.118	0.137	0.213	0.206	0.241
Zr	0.037	0.126	0.177	0.068	0.071	0.107	0.135	0.046
Nb								
Si	4.007	4.026	3.986	4.023	4.023	4.080	4.049	4.022
F	0.197	-	-	-	-	-	0.121	-
Cl	0.001	0.000	-	-	0.002	0.000	0.002	-
Total	12.273	12.144	12.172	12.151	12.144	12.202	12.270	12.200

Litho	C2a	C2a	C2a	C2a	C2a	B3a	B3a	B3a
Amostra	CQ-59	CQ-59	CQ-59	CQ-59	CQ-59	CQ-51	CTII4-444.6	CTII4-444.6
	ttn-17	ttn-18	ttn-19	ttn-20	ttn-21	ttn-22	ttn-23	ttn-24
SiO ₂	29.89	30.08	29.90	29.77	29.77	28.84	29.62	29.51
TiO ₂	34.26	36.02	34.72	34.02	33.49	35.24	35.17	36.42
Al ₂ O ₃	0.08	0.02	0.11	0.11	0.07	0.06	0.07	0.08
Fe ₂ O ₃	2.19	1.70	2.13	2.85	2.09	1.96	1.75	1.77
MnO	0.02	0.03	-	0.04	0.02	0.01	0.09	0.06
MgO	0.01	-	-	0.05	-	-	0.02	0.01
CaO	28.71	29.02	28.75	28.68	28.62	28.39	26.69	26.38
Na ₂ O	0.15	0.28	0.16	0.22	0.23	0.31	0.70	0.87
ZrO ₂	1.60	0.87	1.35	1.38	2.83	0.40	0.34	0.34
Nb ₂ O ₅	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	-
SrO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2.88	4.00
La ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.04	0.07
Ce ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.28	0.37
Nd ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.09	0.12
F	-	-	-	-	-	0.14	-	-
Cl	0.01	0.00	-	0.00	-	-	0.01	0.00
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.00	-	0.00	-	0.06	0.00	0.00
Total	97.41	98.65	97.67	97.67	97.61	95.86	98.05	100.33
Fórmula estrutural com base em 20 oxigênios								
Ca	4.187	4.168	4.177	4.177	4.184	4.197	3.872	3.756
Na	0.040	0.073	0.041	0.058	0.061	0.083	0.183	0.224
Mn	0.002	0.003	-	0.005	0.002	0.001	0.010	0.007
Mg	0.001	-	-	0.010	-	-	0.003	0.001
Sr	-	-	-	-	-	-	-	-
La	-	-	-	-	-	-	0.002	0.004
Ce	-	-	-	-	-	-	0.014	0.018
Nd	-	-	-	-	-	-	0.004	0.006
Ti	3.507	3.632	3.542	3.479	3.437	3.657	3.582	3.640
Al	0.012	0.003	0.018	0.018	0.012	0.010	0.011	0.013
Fe ³⁺	0.224	0.172	0.217	0.292	0.215	0.203	0.178	0.177
Zr	0.106	0.057	0.089	0.092	0.188	0.027	0.023	0.022
Nb							0.176	0.240
Si	4.068	4.032	4.054	4.047	4.062	3.978	4.011	3.921
F	-	-	-	-	-	0.061	-	-
Cl	0.001	0.001	-	0.001	-	-	0.002	0.000
Total	12.199	12.202	12.196	12.235	12.209	12.277	12.098	12.055

Litho	B3a	B3a	B3a	B3a	B3b	B3b	B3b	B3b
Amostra	CQ97-462.8	CQ97-462.8	CQ97-462.8	CQ97-462.8	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CQ97-436.7	CQ-75
	ttn-25	ttn-26	ttn-27	ttn-28	ttn-29	ttn-30	ttn-31	ttn-32
SiO ₂	29.03	28.87	28.91	28.81	29.86	29.39	28.27	29.18
TiO ₂	36.13	35.55	35.05	34.16	35.87	35.91	32.72	35.24
Al ₂ O ₃	0.11	0.12	0.10	0.08	0.14	0.10	0.13	0.11
Fe ₂ O ₃	2.21	2.47	2.02	2.29	2.75	2.56	2.17	2.05
MnO	0.06	0.10	0.03	0.05	0.07	-	0.05	0.09
MgO	0.01	0.02	0.03	0.01	-	0.02	-	0.02
CaO	27.77	27.69	27.04	27.44	27.20	27.41	26.01	26.90
Na ₂ O	0.28	0.29	0.41	0.22	0.20	0.29	0.25	0.34
ZrO ₂	0.77	0.63	1.25	0.89	0.59	0.83	1.01	0.82
Nb ₂ O ₅	-	-	0.03	-	-	-	-	-
SrO	2.13	1.67	2.69	2.12	1.47	1.87	2.37	2.46
La ₂ O ₃	-	0.04	0.07	0.04	0.06	0.05	0.04	0.01
Ce ₂ O ₃	0.24	0.22	0.27	0.20	0.19	0.22	0.21	0.24
Nd ₂ O ₃	0.07	0.05	0.08	0.07	0.05	0.09	0.08	0.05
F	0.66	-	0.11	0.17	0.12	-	0.02	0.42
Cl	0.02	0.02	0.00	-	-	0.01	0.02	-
-O = (F,Cl) ₂	0.28	0.00	0.05	0.07	0.05	0.00	0.01	0.18
Total	99.35	98.00	98.28	96.99	98.74	99.13	93.86	98.04

Fórmula estrutural com base em 20 oxigênios

Ca	3.975	4.029	3.932	4.039	3.905	3.940	3.951	3.899
Na	0.073	0.075	0.108	0.059	0.053	0.075	0.068	0.088
Mn	0.006	0.012	0.003	0.006	0.007	-	0.006	0.010
Mg	0.001	0.005	0.007	0.001	-	0.003	-	0.004
Sr	-	-	0.002	-	-	-	-	-
La	-	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000
Ce	0.012	0.011	0.014	0.010	0.009	0.011	0.011	0.012
Nd	0.003	0.002	0.004	0.004	0.002	0.004	0.004	0.002
Ti	3.631	3.632	3.579	3.530	3.616	3.624	3.490	3.587
Al	0.017	0.020	0.016	0.012	0.022	0.015	0.021	0.017
Fe ³⁺	0.222	0.252	0.207	0.236	0.278	0.259	0.231	0.209
Zr	0.050	0.042	0.083	0.059	0.038	0.055	0.070	0.054
Nb	0.129	0.102	0.165	0.132	0.089	0.113	0.152	0.151
Si	3.878	3.920	3.924	3.958	4.002	3.942	4.008	3.948
F	0.280	-	0.048	0.073	0.050	-	0.007	0.180
Cl	0.005	0.003	0.001	-	-	0.003	0.005	-
Total	12.295	12.135	12.116	12.170	12.095	12.084	12.082	12.188

Litho	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b	B3b
Amostra	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75	CQ-75
	ttn-33	ttn-34	ttn-35	ttn-36	ttn-37	ttn-38	ttn-39	ttn-40
SiO ₂	28.56	29.28	28.51	28.77	29.25	29.16	29.26	28.56
TiO ₂	35.09	35.17	36.10	34.73	34.54	32.63	34.29	35.76
Al ₂ O ₃	0.14	0.13	0.15	0.09	0.15	0.10	0.17	0.11
Fe ₂ O ₃	2.36	2.31	2.30	2.27	2.13	2.23	2.05	2.20
MnO	0.13	0.01	0.04	-	0.04	-	-	0.00
MgO	-	0.06	0.03	-	0.02	0.03	-	0.02
CaO	27.04	27.70	27.23	26.85	27.11	27.26	27.69	27.18
Na ₂ O	0.43	0.43	0.37	0.38	0.38	0.37	0.34	0.42
ZrO ₂	0.86	0.78	0.74	1.07	1.05	0.84	0.64	0.80
Nb ₂ O ₅	-	0.03	-	-	-	-	-	-
SrO	3.58	2.70	2.16	1.94	2.70	2.63	2.55	2.47
La ₂ O ₃	0.07	0.02	0.04	0.07	0.05	0.05	0.06	0.06
Ce ₂ O ₃	0.27	0.24	0.22	0.27	0.26	0.24	0.17	0.22
Nd ₂ O ₃	0.12	0.05	0.06	0.04	0.04	0.09	0.05	0.07
F	-	0.34	0.20	0.14	0.20	0.29	0.09	0.20
Cl	0.00	-	0.01	-	0.02	-	0.01	-
-O = (F,Cl) ₂	0.00	0.14	0.09	0.06	0.09	0.12	0.04	0.08
Total	98.93	99.28	98.70	96.94	98.20	96.28	97.67	98.41
Fórmula estrutural com base em 20 oxigênios								
Ca	3.924	3.976	3.940	3.952	3.939	4.038	4.040	3.945
Na	0.113	0.112	0.096	0.100	0.100	0.100	0.090	0.109
Mn	0.014	0.001	0.005	-	0.005	-	-	0.000
Mg	-	0.013	0.005	-	0.003	0.006	-	0.003
Sr	-	0.002	-	-	-	-	-	-
La	0.004	0.001	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003
Ce	0.013	0.012	0.011	0.014	0.013	0.012	0.009	0.011
Nd	0.006	0.002	0.003	0.002	0.002	0.004	0.002	0.003
Ti	3.575	3.545	3.668	3.589	3.523	3.394	3.513	3.645
Al	0.022	0.021	0.024	0.015	0.024	0.016	0.027	0.018
Fe ³⁺	0.240	0.233	0.233	0.234	0.217	0.232	0.210	0.224
Zr	0.057	0.051	0.049	0.072	0.069	0.057	0.042	0.053
Nb	0.219	0.164	0.132	0.121	0.165	0.164	0.157	0.151
Si	3.868	3.923	3.851	3.952	3.966	4.032	3.984	3.869
F	-	0.144	0.085	0.059	0.087	0.125	0.037	0.085
Cl	0.000	-	0.003	-	0.005	-	0.002	-
Total	12.079	12.220	12.173	12.142	12.151	12.230	12.151	12.159

Litho	B3b	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Amostra	CQ-75	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1	CTH4-413.1
	ttn-41	ttn-42	ttn-43	ttn-44	ttn-45	ttn-46	ttn-47
SiO ₂	28.56	29.69	29.75	29.77	29.91	29.69	29.42
TiO ₂	34.28	33.91	34.96	33.69	35.04	36.07	33.70
Al ₂ O ₃	0.11	0.04	0.06	0.05	0.12	0.06	0.05
Fe ₂ O ₃	2.12	2.02	1.88	1.89	2.11	2.12	1.98
MnO	-	0.05	0.04	0.01	0.05	0.08	0.08
MgO	-	0.04	0.04	0.05	0.03	-	0.05
CaO	27.22	26.88	27.23	27.78	27.85	27.80	27.35
Na ₂ O	0.35	0.39	0.26	0.34	0.21	0.16	0.30
ZrO ₂	0.90	1.22	1.22	1.36	0.75	0.61	1.40
Nb ₂ O ₅	-	-	-	0.04	-	-	-
SrO	2.77	3.15	2.08	2.41	1.61	1.14	2.01
La ₂ O ₃	0.09	0.03	0.04	0.02	0.07	-	0.04
Ce ₂ O ₃	0.26	0.31	0.16	0.27	0.18	0.20	0.18
Nd ₂ O ₃	0.06	0.08	0.08	0.07	0.05	0.03	0.05
F	0.12	0.29	0.42	0.17	0.26	0.43	0.08
Cl	0.00	-	0.01	0.00	0.01	-	-
-O = (F,Cl) ₂	0.05	0.12	0.18	0.07	0.11	0.18	0.03
Total	97.27	98.51	98.47	98.06	98.91	98.50	97.04
Fórmula estrutural com base em 20 oxigênios							
Ca	4.001	3.894	3.926	4.039	4.003	3.993	4.019
Na	0.094	0.101	0.067	0.088	0.054	0.041	0.080
Mn	-	0.005	0.004	0.001	0.005	0.009	0.010
Mg	-	0.008	0.007	0.011	0.007	-	0.011
Sr	-	-	-	0.003	-	-	-
La	0.004	0.001	0.002	0.001	0.003	-	0.002
Ce	0.013	0.015	0.008	0.013	0.009	0.010	0.009
Nd	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.001	0.002
Ti	3.539	3.449	3.539	3.440	3.537	3.637	3.477
Al	0.017	0.006	0.010	0.008	0.019	0.009	0.008
Fe ³⁺	0.219	0.206	0.190	0.193	0.213	0.213	0.204
Zr	0.060	0.080	0.080	0.090	0.049	0.040	0.093
Nb	0.172	0.193	0.127	0.148	0.098	0.069	0.125
Si	3.919	4.015	4.003	4.039	4.013	3.980	4.035
F	0.054	0.123	0.180	0.075	0.112	0.183	0.035
Cl	0.001	-	0.002	0.000	0.002	-	-
Total	12.147	12.146	12.191	12.173	12.195	12.218	12.144

[illegible]

Litho	C2b	C2b	C2b	B3b	C3
Amostra	CQ-62	CQ-63	CQ-63	CQ97-436.7	CTII4-413.1
Grão	amp-16	amp-17	amp-18	amp-19	amp-20
SiO ₂	57.96	56.05	54.70	53.52	49.53
TiO ₂	0.19	0.44	0.43	0.33	0.14
Al ₂ O ₃	0.02	0.02	0.09	0.25	0.22
FeO _T	9.89	11.61	11.73	14.00	14.85
Fe ₂ O ₃ *	3.72	0.37	6.70	4.80	0.63
FeO *	6.54	11.27	5.70	9.68	14.29
MnO	0.20	0.15	0.15	0.42	0.41
MgO	18.60	16.87	16.17	14.82	11.67
CaO	3.34	5.13	4.46	2.81	4.47
Na ₂ O	3.31	3.11	4.68	5.92	6.09
K ₂ O	4.59	4.45	4.97	5.10	3.74
F	2.29	0.93	1.06	0.78	0.92
Cl	-	-	-	0.01	0.04
-O = (F,Cl) ₂	1.15	0.46	0.53	0.39	0.46
Total	99.61	98.33	98.59	98.05	91.70
Fórmula estrutural com base em 23 oxigênios (O, F,Cl)					
Si	8.169	8.084	7.992	7.898	7.927
Al	-	-	0.008	0.044	0.042
Ti	-	-	-	0.037	0.017
ΣT	8.169	8.084	8.000	7.979	7.986
Al	0.004	0.004	0.008	-	-
Ti	0.020	0.048	0.047	-	-
Fe ³⁺	1.325	0.516	0.690	0.867	0.731
Fe ²⁺	-	0.804	0.733	0.861	1.257
Mn	-	-	-	0.012	0.056
Mg	3.651	3.628	3.521	3.260	2.785
ΣC	5.000	5.000	5.000	5.000	4.828
Ca	0.504	0.792	0.698	0.445	0.766
Na	0.903	0.870	1.274	1.515	1.234
Fe ²⁺	-	0.080	0.010	-	-
Mn	0.023	0.019	0.018	0.040	-
Mg	0.257	-	-	-	-
ΣB	1.688	1.760	2.000	2.000	2.000
Na	-	-	0.053	0.180	0.657
K	0.826	0.819	0.926	0.960	0.763
ΣA	0.826	0.819	0.980	1.139	1.420
OH	0.978	1.577	1.509	1.637	1.522
Cl	-	-	-	0.001	0.012
F	1.022	0.423	0.491	0.362	0.466
ΣOH	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000

Tabela I. Composição química de elementos maiores para rochas de Catalão II.

Litho	B1	B1	B1	B2a	B2a	B2a	B2b	B2b
Amostra	CQ97-71.6	MP-RM15-213.7	CTH4-444.6	CQ-04	CQ-05	CQ-06	CQ-08	CQ-22
Elemento (wt.%)								
SiO ₂	44.02	45.34	42.84	33.09	30.41	31.41	14.28	18.1
TiO ₂	0.40	0.26	0.89	5.4	1.68	3.97	2.13	0.74
Al ₂ O ₃	5.32	1.13	2.59	1.4	0.08	1.25	0.39	0.5
Fe ₂ O ₃	11.97	11.94	16.00	11.28	18.93	13	26.05	11.94
MnO	0.22	0.62	0.31	0.16	0.17	0.18	0.23	0.13
MgO	17.00	13.05	10.70	10.45	9.95	11.05	4.8	6.88
CaO	10.30	14.15	15.85	23.8	24.6	24.1	27.8	32.7
Na ₂ O	0.90	3.04	2.32	0.46	0.92	0.53	0.93	0.49
K ₂ O	5.69	3.55	3.16	2.01	0.79	2.27	1.48	2.27
BaO	0.03	0.09	0.07	0.08	0.06	0.07	0.05	0.06
SrO	0.07	0.19	0.18	0.18	0.18	0.22	0.33	0.35
P ₂ O ₅	1.21	0.19	0.63	7.29	8.62	9.61	17.1	21.8
C	0.11	1.35	1.15	0.55	0.77	0.48	0.74	0.34
S	0.01	<0.01	0.01	0.1	1.09	0.04	0.45	0.03
LOI	1.33	6.19	4.88	2.2	1.44	2.18	1.72	1.94
Total	98.89	99.89	100.70	99.16	101.05	100.25	98.84	98.28

Litho	B2b	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	FLAP	C2a	C2a	C2a
Amostra	CQ-23	CQ-26	CQ-32	CQ-42	CQ-49	CQ-52	CQ-59	CQ97-139.2	CQ97-141.1
Elemento (wt.%)									
SiO ₂	20.62	18.86	15.58	13.25	9.43	18.75	14	15.03	13.74
TiO ₂	2.34	2.1	0.85	1.62	4.53	1.3	2.44	2.41	2.35
Al ₂ O ₃	0.32	0.58	0.3	0.12	0.1	2.06	1.05	1.02	0.72
Fe ₂ O ₃	26.75	26.72	15.78	16.72	49.49	16.56	10.15	12.32	11.06
MnO	0.23	0.24	0.1	0.17	0.3	0.18	0.14	0.15	0.15
MgO	8.19	7.2	8.45	8.75	7.28	7.53	4.59	4.9	4.21
CaO	21.8	19.15	30	29.9	14.15	25.1	35	35.8	36
Na ₂ O	0.62	0.18	0.19	0.13	0.07	0.14	0.23	0.3	0.67
K ₂ O	2.76	4.5	3.84	3.41	2.34	4.67	2.92	1.56	2.35
BaO	0.05	0.04	0.05	0.06	0.13	0.15	0.28	0.18	0.17
SrO	0.24	0.26	0.36	0.38	0.18	0.52	0.79	0.81	0.77
P ₂ O ₅	12.85	13.55	22.6	22.7	10.1	18.25	2.7	1.82	3.37
C	0.48	0.34	0.31	0.38	0.6	0.75	6.46	6.33	6.4
S	0.31	2.82	0.06	1.32	0.18	0.19	0.07	0.3	0.12
LOI	1.6	1.09	1.98	1.36	1.13	3.49	24.44	22.94	23.92
Total	99.56	101.1	100.45	101.95	100.25	99.28	99.07	100.2	100

Litho	C2b	C2b	C2b	C2b	B3a	B3a	B3b	C3	C3
Amostra	CQ-63	CQ-65	CTII4-408.1	CQ97-529.8	CQ97-462.8	CTII4-104.1	CQ97-436.7	CTII04-184.9	CTII04-413.1
Elemento (wt.%)									
SiO ₂	3.89	1.74	8.32	1.38	23.74	27.81	29.71	10.97	20.69
TiO ₂	0.47	0.41	0.5	0.46	2.3	1.82	10.2	0.54	0.56
Al ₂ O ₃	0.1	0	0.79	0	1.52	1.95	0.4	1.05	1.04
Fe ₂ O ₃	5.94	6.26	8.89	15.14	10.1	13.3	8.23	7.95	10.67
MnO	0.11	0.09	0.16	0.12	0.16	0.22	0.15	0.15	0.21
MgO	1.44	1.54	3.39	1.42	6.07	8.41	4.12	2.73	4.29
CaO	47.5	46.9	40.4	42.2	30.7	20.6	28.1	40.1	33.3
Na ₂ O	0.16	0.05	0.62	0.06	0.85	1.32	1.79	0.39	1.2
K ₂ O	0.84	0.5	2.19	0.42	2.33	4.67	1.16	1.81	2.17
BaO	0.3	0.36	0.42	0.43	0.06	0.17	0.09	0.29	0.33
SrO	1.34	>1.50	1.33	>1.50	0.33	0.48	0.28	1.17	0.96
P ₂ O ₅	2.03	0.71	0.53	1.13	18.15	5.74	9.41	3.31	3.7
C	9.29	10.2	9.26	9.05	0.32	2.69	0.8	7.99	5.85
S	0.33	0.51	0.07	5.11	0.02	0.07	0.01	0.4	0.05
LOI	34.88	37.36	32.81	23.04	1.81	10.49	3.5	27.67	20.7
Total	100.1	98.83	100.85	99.7	99.08	99.34	99.02	99.51	100.25

Tabela J. Composição química de elementos traço e terras raras para rochas de Catalão II.

Litho	B1	B1	B1	B2a	B2a	B2a	B2b
Amostra	CQ97-71.6	MP-RM15-213.7	CTII4-444.6	CQ-04	CQ-05	CQ-06	CQ-08
Elemento (ppm)							
Cr	1485.0	18.0	5.0	<10	<10	10.0	30.0
Ni	422.0	1.0	5.0	5.0	11.0	8.0	10.0
Rb	198.5	102.5	158.5	87.3	20.5	96.6	50.3
Y	9.5	9.8	12.1	73.6	25.3	48.8	45.3
Zr	285.0	222.0	824.0	7440.0	2020.0	1525.0	1075.0
Nb	127.0	72.6	82.2	911.0	63.4	190.5	72.8
La	54.3	60.9	104.5	409	181.5	473	399
Ce	142.5	139.0	223.0	1195	436	1190	1005
Pr	18.2	15.9	24.4	152	55.4	140	118
Nd	75.5	58.7	86.8	635	222	542	462
Sm	10.1	8.6	11.7	100	32.7	74.2	62.9
Eu	2.6	2.0	2.6	25.2	8.1	17.4	15.15
Gd	6.2	5.3	6.4	57.9	18.75	40	35.6
Tb	0.6	0.5	0.7	6.35	1.95	3.96	3.53
Dy	2.9	2.5	3.7	28.6	8.85	17.3	15.8
Ho	0.4	0.4	0.5	3.62	1.12	2.11	1.9
Er	0.9	0.9	1.2	7.72	2.38	4.3	3.93
Tm	0.1	0.2	0.1	0.77	0.24	0.43	0.37
Yb	0.6	1.3	1.0	3.41	1.21	1.8	1.74
Lu	0.1	0.2	0.2	0.37	0.15	0.19	0.21
Hf	9.1	6.8	22.9	194.0	50.2	43.1	24.5
Ta	8.4	0.4	6.0	144.5	6.2	27.0	4.1
Th	2.9	6.2	5.7	223.0	11.0	61.7	15.7

Litho Amostra	B2b CQ-22	B2b CQ-23	FLAP CQ-26	FLAP CQ-32	FLAP CQ-42	FLAP CQ-49	FLAP CQ-52
Elemento (ppm)							
Cr	<10	30.0	60.0	10.0	30.0	30.0	20.0
Ni	2.0	6.0	29.0	11.0	14.0	4.0	3.0
Rb	108.0	112.0	244.0	175.5	128.5	92.9	255.0
Y	52.5	29.2	33.9	54.0	52.4	25.0	72.9
Zr	2020.0	1495.0	826.0	353.0	471.0	975.0	122.0
Nb	45.5	107.5	268.0	67.1	203.0	174.0	111.0
La	403	258	300.0	425.0	512.0	226.0	804.0
Ce	1045	609	708.0	1070.0	1235.0	507.0	1820.0
Pr	127	75.1	86.4	138.0	147.0	60.7	212.0
Nd	513	287	328.0	554.0	570.0	229.0	768.0
Sm	72.8	42.7	47.3	75.7	77.1	32.9	104.5
Eu	17.2	9.43	10.6	18.1	17.3	7.8	23.8
Gd	42.7	23.2	25.5	43.0	40.5	19.7	55.9
Tb	4.19	2.44	2.6	4.3	4.3	2.0	5.8
Dy	18.4	9.97	11.0	18.5	18.2	8.5	24.1
Ho	2.3	1.28	1.5	2.4	2.4	1.2	3.1
Er	4.69	2.75	3.0	4.8	4.4	2.3	6.0
Tm	0.41	0.27	0.3	0.5	0.4	0.2	0.5
Yb	2.03	1.21	1.5	1.9	2.1	0.8	2.7
Lu	0.22	0.12	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2
Hf	44.5	31.1	14.7	7.8	10.5	21.6	3.0
Ta	1.6	8.5	12.0	4.6	8.6	14.0	8.4
Th	15.1	12.5	8.9	10.1	10.1	5.4	23.3

Litho	C2a	C2a	C2a	C2b	C2b	C2b	C2b
Amostra	CQ-59	CQ97-139.2	CQ97-141.1	CQ-63	CQ-65	CTII4-408.1	CQ97-529.8
Elemento (ppm)							
Cr	30.0	20.0	20.0	20.0	20.0	12.0	6.0
Ni	10.0	26.0	24.0	<1	<1	10.0	9.0
Rb	128.0	67.9	84.5	30.8	31.9	26.3	106.0
Y	46.8	37.5	41.7	43.1	27.1	23.4	37.6
Zr	504.0	503.0	501.0	1035.0	398.0	54.0	623.0
Nb	597.0	533.0	515.0	103.5	516.0	1250.0	78.9
La	435	357	390	576	385	308	420
Ce	899	771	886	1145	736	670	838
Pr	101	84.9	99.4	121	72.9	63.9	85.2
Nd	362	314	367	413	244	210	306
Sm	50.1	40.1	46.2	47.1	26.6	22.6	36.5
Eu	11.85	9.21	11.55	11.15	6.03	5.57	8.19
Gd	28.5	22.3	26.7	24.7	14.3	12.25	20.5
Tb	3.06	2.32	2.86	2.71	1.58	1.29	2.07
Dy	13.45	10.25	12.3	12.05	6.96	5.79	9.59
Ho	1.89	1.51	1.84	1.66	0.97	0.81	1.45
Er	3.82	3.28	3.56	3.73	1.99	1.96	3.4
Tm	0.37	0.34	0.36	0.36	0.23	0.23	0.39
Yb	2.21	1.85	1.93	2.02	1.3	1.2	1.59
Lu	0.24	0.21	0.22	0.24	0.18	0.23	0.3
Hf	14.5	15.4	13.5	20.0	10.8	2.0	8.1
Ta	96.9	98.3	62.6	19.4	5.8	15.6	1.6
Th	11.2	7.6	16.7	19.0	21.1	42.3	8.1

Litho	B3a	B3a	B3b	C3	C3	FEN	FEN
Amostra	CQ97-462.8	CTII4-104.1	CQ97-436.7	CTII4-184.9	CTII4-413.1	CQ104-545.2	CQ104-528.9
Elemento (ppm)							
Cr	23.0	16.0	17.0	5.0	5.0	17	927
Ni	21.0	20.0	26.0	14.0	13.0	15	305
Rb	107.0	181.0	33.1	84.1	94.9	128	82.4
Y	51.4	51.1	90.9	43.5	40.0	10.3	20.7
Zr	6110.0	>10000	>10000	1390.0	1330.0	70	95
Nb	881.0	758.0	4564.8	42.7	104.0	15.35	23.3
La	406	395	533	574	461	40.5	32
Ce	1025	935	1465	1155	956	102	64.5
Pr	127.5	107	191.5	119.5	103.5	12.85	6.94
Nd	503	405	764	423	356	51.6	26.5
Sm	68.5	53.1	108	48.1	43.4	7.05	3.72
Eu	15.5	11.35	26	11.35	9.34	1.9	1.46
Gd	38.9	28.9	58.4	26.2	24.6	4.11	3.99
Tb	3.91	3.05	6.39	2.81	2.74	0.47	0.67
Dy	16.15	14.15	27	11.65	11.45	2.71	4.08
Ho	2.36	2.18	4.01	1.78	1.89	0.4	0.73
Er	4.94	4.93	8.55	3.56	3.46	0.98	2.25
Tm	0.52	0.63	1.06	0.41	0.36	0.15	0.25
Yb	2.74	3.16	4.86	2.05	1.85	1.2	1.85
Lu	0.38	0.5	0.72	0.28	0.33	0.23	0.25
Hf	135.0	423.0	228.0	26.4	19.5	1.5	2.84
Ta	96.6	204.0	579.0	10.1	6.6	0.8	1.2
Th	18.3	54.1	47.0	7.5	16.2	2.21	3.11