



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Evolução Magmática e Metamórfica da Intrusão Máfica
Ultramáfica Mineralizada a Ni-Cu-PGE de Mangabal, Brasil
Central**

Cláudia Tharis Augustin

Orientadora: Maria Emília Schutesky Della Giustina

Brasília – DF

Fevereiro de 2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Evolução Magmática e Metamórfica da Intrusão Máfica
Ultramáfica Mineralizada a Ni-Cu-PGE de Mangabal, Brasil
Central**

Cláudia Tharis Augustin

Examinadores:

Maria Emília Schutesky Della Giustina (Orientadora)

Reinhardt A. Fuck – UnB

Juliana Charão Marques – UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família que me apoia incondicionalmente. À minha *irmã* que não faz ideia do que o mundo geológico significa, mas sempre me apoiou a estar nele. À minha *mãe* que sempre está torcendo e trabalhando por mim. Ao meu *pai* e *avô* que não fazem ideia do que faço nem porquê, mas sempre me perguntam. E ao *Ryan*, que no último ano deste mestrado me agraciou com risadas durante tardes.

Agradeço imensamente à minha orientadora, e hoje amiga, *Emília*, que por mais que queira ser Nazaré, é no máximo o Rei dos Magos. Por todas as conversas geológicas e não geológicas, pelo apoio nos estudos das rochas mágicas-ultramáficas e, enfim, pela amizade.

Um super agradecimento especial ao *Victor Garcia*, o primeiro de seu nome, Fifty, o quebrador de dinheiro, julgador de artistas, escalador de postes, treinador de sedentários e companheiro de viagens. Por toda parceria incondicional durante este mestrado e na vida. Por acreditar em mim, as vezes mais do que eu mesma.

Ao povo da *Republica Bom Dia Geo* que me abrigou e dividiu moradia comigo nesta etapa da vida. Aos colegas da sala 300/8 que dividiram dias na mesma sala quente sem perder o bom humor. Ao Felipe Ruiz, por ter se auxiliado na amostragem dos testemunhos e por todas as risadas que nos forneceu neste campo. Aos funcionários da Microsonda Eletrônica, principalmente a Isabela, por ter dado aquele *help* quando preciso. Aos professores do IG que me acompanharam desde a graduação até esta etapa de mestrado, sempre contribuindo com conversas geológicas.

RESUMO

Inserido no contexto do Arco Magmático de Goiás, o Complexo máfico-ultramáfico Mangabal está associado a um conjunto de diversas intrusões neoproterozóicas formadas durante o a orogenia brasileira, no centro do Brasil. Este trabalho tem como objetivo apresentar a evolução magmática e o metamorfismo do Complexo máfico-ultramáfico Mangabal. Para tanto foram realizados trabalhos de campo, descrição e amostragem de testemunhos de sondagem, descrições petrográficas em seções delgadas e polidas, química mineral, imageamento em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e análises químicas isotópicas de isótopos de Sm e Nd.

O Complexo Mangabal está inserido na Zona de Cisalhamento São Luís dos Montes Belos e é composto por dois corpos máfico-ultramáficos acamadados metamorfizados. O membro norte apresenta aproximadamente 6 km²; já o membro sul, distante aproximadamente 2 km do anterior, possui aproximadamente 29 km² de área em superfície. Ambos os corpos exibem a mesma mineralogia, sequência de cristalização ígnea e composição química mineral. A estratigrafia do Complexo de Mangabal pode ser dividida em três zonas principais: i. Zona Máfica Inferior, localizada na porção basal da intrusão, composta por norito adcumulático; ii. Zona Ultramáfica, caracterizada por dunito e harzburgito e iii. Zona Máfica Superior, predominantemente de composição norito, com porções isoladas de dunito feldspático. O complexo apresenta sequência de cristalização composta por: Olivina + Cromo-Espinélio > Olivina + Ortopiroxênio > Ortopiroxênio + Plagioclásio > Clinopiroxênio.

A mineralogia primária das rochas é frequentemente substituída por mineralogia metamórfica, devido ao metamorfismo heterogêneo sobreposto ao Complexo. Apesar da recristalização mineralógica, tal transformação metamórfica muitas vezes preserva as texturas magmáticas. O metamorfismo sobreposto ao complexo atingiu fácies metamórfica anfibolito de alta pressão, marcada pela presença da paragênese cianita-ortoanfíbólio-hornblenda-plagioclásio, atingindo pressões de aproximadamente 8.5 kbar e temperaturas de até aproximadamente 750 °C.

A mineralização primária de Ni-Cu-EGP sulfetado ocorre em rochas máficas e ultramáficas do complexo, porém a deformação superimposta no complexo pode localmente remobiliza-la. A mineralização é predominantemente do tipo disseminada, tanto nas rochas máficas quanto ultramáficas, porem localmente ocorrem em textura maciça.

PALAVRAS-CHAVE: Neoproterozóico, intrusões máficas-ultramáficas acamadadas sintectônicas, Arco Magmático de Goiás, Complexo de Mangabal, mineralização de Ni-Cu-EGP sulfetado

ABSTRACT

Inserted in the context of the Goiás Magmatic Arc, the mafic-ultramafic complex of Mangabal is associated with several neoproterozoic mafic-ultramafic intrusions formed during the Brasiliano Orogeny in the center of Brazil. This study included fieldwork data, systematic drill-core sampling, mineral chemistry and Sm-Nd isotopic geochemistry in order to better understand the petrology of the mafic-ultramafic complex of Mangabal and associated Ni-Cu-PGE mineralization.

The Mangabal Complex is inserted in the São Luís dos Montes Belos Shear Zone and is composed of two metamorphosed mafic-ultramafic bodies. The northern limb is approximately 6 km² and is stretched towards E-W; already the south member, distant approximately 2 km of the previous one, is approximately 10km wide by 5.5km long. Both bodies exhibit the same mineralogy, igneous crystallization sequence and mineral chemistry. The stratigraphy of the Mangabal Complex can be divided into three main zones: i. Lower Mafic Zone, located in the basal portion of the intrusion, composed by addcumulatic norite; ii. Ultramafic Zone, characterized by dunite and harzburgite and iii. Upper Mafic Zone, consisting predominantly of norite composition, with isolated portions of feldspathic dunite. The complex has the following crystallization: Olivine + Chromium-Spinel > Olivine + Orthopyroxene > Orthopyroxene + Plagioclase > Clinopyroxene.

The primary mineralogy is often replaced due to an overlapping heterogeneous metamorphic transformation. Despite the mineralogical recrystallization, metamorphic transformation often preserves the magmatic textures. The metamorphism superimposed on the complex reached high-pressure amphibolite facies, marked by the presence of kyanite-ortoamphibole-hornblende, reaching pressures of approximately 8.5 kbar and temperatures up to 780 ° C.

The primary Ni-Cu-EGP sulfide mineralization occurs in mafic and ultramafic rocks of the complex, but the deformation in the complex can locally remobilize the sulfides and, particularly, nickel and palladium. The mineralization is predominantly disseminated, occurring in both mafic and ultramafic rocks, but massive sulfide levels occur locally, mainly in metamorphic portions.

KEYWORDS: Neoproterozoic, sintectonic layered intrusions, Goiás Magmatic Arc, Mangabal Complex, Ni-Cu-PGE sulfide mineralization

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABELAS	4
CAPÍTULO 1	5
1. APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS	5
2. LOCALIZAÇÃO	5
3. ASPECTOS DE CAMPO	6
4. GEOLOGIA REGIONAL	9
5. ESTUDOS ANTERIORES	12
6. JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	13
CAPÍTULO 2 –	15
PETROLOGY OF THE Ni-Cu (PGE) SULFIDE BEARING MAFIC ULTRAMAFIC ROCKS OF THE MANGABAL COMPLEX, SANCLERLÂNDIA, GOIÁS – BRAZIL*ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
1. INTRODUCTION	15
2. GEOLOGICAL SETTING	16
3. SAMPLING AND ANALYTICAL PROCEDURES	19
4. GEOLOGY OF THE MANGABAL COMPLEX	20
4.1. IGNEOUS ROCKS	20
4.2. METAMORPHIC ROCKS	25
4.3. MINERALIZATION	27
5. MINERAL CHEMISTRY	31
6. SM-ND ISOTOPES	35
7. GEOTHERMOBAROMETRY	35
8. DISCUSSION	36
9. CONCLUSIONS	41
ACKNOWLEDGEMENTS	42
CAPÍTULO 3	43

1. DISCUSSÃO	43
2. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de localização da área de estudo e principais vias de acesso. Complexo de Mangabal em evidência como polígonos escuros à sul-sudeste de Sanclerlândia.	6
Figura 2 Paisagem da área de estudos. Foto tirado de Mangabal Norte, com vista para sul. É possível ver a Serra de Mangabal, que contorna o corpo norte e ao fundo parte do corpo sul. .	7
Figura 3 A) Fotografia tirada em Mangabal Norte, mostrando blocos métricos de norito. B) Foto tirada em Mangabal Sul mostrando bloco de gossan.	7
Figura 4 Fotografia de anfibolito foliado.	8
Figura 5 Foto de afloramento de anfibolito próximo a zona de falha que marca o contato sul de Mangabal Norte. A foliação fica vertical em zona de falha, com rocha bastante alterada.....	8
Figura 6 Mapa geotectônico esquemático da Faixa Brasília com suas compartimentações. (Modificado de Valeriano et al, 2008)	10
Figura 7 A) Mapa geológico simplificado do Arco de Arenópolis na região de Anicuns indicando as principais intrusões máfico-ultramáficas. 1-2 Complexo de Mangabal; 3 - Americano do Brasil; 4 - Agua Fria; 5 - Adelândia; 6 - Fronteira Norte; 7 - Córrego Seco; 8 - Aguas Claras; 9 - Capelinha; 10 - Taquaral; 11 - Santa Rosa; 12 - Damolândia; 13 - Santa Barbara; 14 - Goianira Trindade; 15 - Mata Rica e Palmito; 16 – Palmeiras. Modificado de Mota-e-Silva et al. (2011), Macedo (2016;). B) Detalhe do Complexo de Mangabal.	11
Figura 8 Analytical signal amplitude (nT/m). Modificado de Mota-e-Silva et al 2011. Legenda: 1 Americano do Brasil, 2 Complexo Mangabal, 3 Água Fria, 4 Adelândia, 5 Fronteira Norte, 6 Palmeiras, 7 Mata Rica e Palmito, 8 Água Claras, 9 Capelinha, 10 Taquaral, 11 Sta Rosa, 12 Damolândia, 13 Goianira–Trindade, 14 Córrego Seco, 15 Santa Bárbara. As linhas pontilhadas indicam aproximadamente o limite das intrusões e a linha contínua a estrutura que liga os corpos.	14
Figura 9 Schematic map of the Brasilia Belt. Modified from Valeriano et al, 2008.....	17
Figura 10 – Simplified geological map showing the orogenic 600 – 630 Ma mafic and mafic-ultramafic (MUM) intrusions. 1-2 Mangabal Complex; 3 - Americano do Brasil; 4 - Agua Fria; 5 - Adelândia; 6 - Fronteira Norte; 7 - Córrego Seco; 8 - Aguas Claras; 9 - Capelinha; 10 - Taquaral; 11 - Santa Rosa; 12 - Damolandia; 13 - Santa Barbara; 14 - Goianira Trindade; 15 - Mata Rica e Palmito; 16 – Palmeiras. Modified from Macedo, 2016 and Mota-e-Silva et al, 2011.	18

Figura 11 Stratigraphy of Northern and Southern Limb of Mangabal Complex. The circles show the macroscopic characteristic of the rock, the outline colour of the circle is the same of the equivalent rock on the stratigraphic column.....	22
Figura 12 Photomicrographs of major rock types from the Mangabal Complex. (A) Typical bronzite-plagioclase in norite of Lower Mafic Zone. (B) The typical cumulate texture of olivine on dunite. On the picture is possible to note small euhedral to subhedral cr-spinel. Plagioclase, Orthopyroxene and phlogopite on interstitial spaces. (C) The typical poikilitic texture of orthopyroxene enclosing olivine and coexistent with olivine. (D) The typical interlayer of plagioclase and bronzite on norite. (E) Olivine cumulate of feldspathic dunite, plagioclase is a common intercumulus phase. (F) Detailed olivine with the double rim, an inner shell of polycrystalline orthopyroxene and an outer zone of amphibole.....	24
Figura 13 Drill core of igneous rocks. A. Dunite of ultramafic zone. B. Norite of upper mafic zone.....	25
Figura 14 Example of drill-core rocks of metamorphic rocks of Mangabal Complex. A. Amphibolite preserving norite texture. B. Amphibolite with kyanite-quartz vein.....	26
Figura 15 Photomicrographs of amphibolite of the Mangabal Complex. (A) Typical amphibolite in grano-nemotoblastic texture. Magnesium-hornblende, anthophyllite and biotite in an in a preferred direction and plagioclase on granoblastic texture. (B) Typical Kyanite-Amphibolite. Major grain of Kyanite (upper than 1,5mm) in optical continuity, between quartz, amphibole and plagioclase.	27
Figura 16 Compositional variations of cumulus minerals and Ni-Cu-Pg-Pt contents throughout the stratigraphy of the Mangabal Complex. Exploration assay data from Votorantin Metais is shown.....	28
Figura 17 Photomicrographs of sulfides. (A) Pyrrhotite and polycrystalline veinlets of pentlandite. (B) Pyrrhotite and pentlandite with exsolution of pyrite. C) Some examples of sulphides on drill core rocks.....	30
Figura 18 Pd-Ni-Bi-Tellurite in pyrite on massif sulphide of amphibolite.	30
Figura 19 Photography and schematic draw of the picture showing the contact between amphibolite and norite and the difference of the spatial distribution of sulfides. The amphibolite show more coarse agglomerate of sulfides, while the norite show the small and more disseminated mass of sulfide.	31
Figura 21 Composition of metamorphic hornblende.....	34
Figura 22 Evolution diagram of ϵNd vs time for Mangabal Complex's samples.	35

Figura 25 The stability fields of the assemblage ky-hbl, st-hbl and aluminossilicate + ortoamphibole (+ plg, quartz and aqueous vapos) on the CFMASH phase diagram. Modified from Arnold (1994). The red campi s the one wich representes Mangabal complex.....38

Figura 26 Photomicrographs of clinopyroxene in poikilitic texture in norite. A to D shows a sequence of texture evolution of the amphibole replacing pyroxene.40

Figura 27 The stability fields of the assemblages ky-hbl, st-hbl and aluminossilicate + ortoamphibole (+ plg, quartz and aqueous vapos) on the CFMASH phase diagram. Modified from Arnold (1994). The red draw is the one which represents Mangabal complex.....45

Figura 28 Photomicrographs of norite rocks and clinopyroxene oikocrysts. A) Oikocryst of Clinopyroxene and chadacrysts of ortopyroxene. B) Clinopyroxene oikocryst partially altered to hornblende. C) Amphibolite with textural relicts of clinopyroxene. D) Metanorite with ortopyroxene cumulate and clinopyroxene partially altered to amphibole and biotite.48

ÍNDICE DE TABELAS

Table 1 Dados geocronológicos dos Complexos Mangabal e Americano do Brasil (Dados U-Pb pelo método ID-TIMS).....	11
Table 2 Geochronological ages for Americano do Brasil and Mangabal Complexes.....	19
Table 3 Representative analysis of igneous minerals.....	32
Table 4 Sm-Nd isotopic data for the Mangabal Complex.....	35
Table 5 Thermobarometry of Mangabal Complex amphibolite calculated by Holland and Blundy (1994) and Anderson and Smith (1995)	36

CAPÍTULO 1

1. Apresentação e Objetivos

O Complexo Máfico-Ultramáfico Mangabal (corpos Norte e Sul) está localizado no centro-leste do Arco de Arenópolis, porção sul do Arco Magmático de Goiás, próximo à cidade de Sanclerlândia – Goiás. Consiste em dois corpos estratiformes e metamorfizados, compostos por rochas máficas e ultramáficas, contendo mineralizações de níquel e cobre, além da presença de elementos do grupo da platina (EGP).

A presente dissertação teve como objetivo caracterizar a mineralogia e petrologia das intrusões bem como da mineralização de níquel, cobre e elementos do grupo da platina (EGP) associada. Os processos geológicos e metalogenéticos que atuaram nos complexos são de conhecimento ainda restrito, sendo este trabalho idealizado para elucidar algumas questões relativas aos complexos. Para tanto, pretendeu-se atingir objetivos específicos como: detalhamento da geologia e da petrografia dos Complexos; caracterização e elucidação das diferenças e/ou semelhanças entre os dois complexos; realização de estudos sistemáticos de química mineral e geoquímica isotópica. Por fim, com este trabalho pretendeu contribuir para o avanço do conhecimento geológico e metalogenético do Arco Magmático de Goiás.

Devido à similaridade mineralógica, química, textural e isotópica, a partir deste trabalho ambas as intrusões serão inseridas na denominação de Complexo de Mangabal, constituído, portanto, pelo corpo norte (*northern limb*), na literatura conhecido como Mangabal I ou Mangabal Norte, e corpo sul (*southern limb*), definido anteriormente como Mangabal II ou Mangabal Sul.

2. Localização

A área de estudos está localizada a aproximadamente 8 km ao sul-sudeste da cidade de Sanclerlândia (Fig. 1), no centro-oeste do Estado de Goiás, a aproximadamente 130 km de Goiânia. As principais vias de acesso da cidade de Sanclerlândia são as GO-164, GO-222 e GO 326, sendo que a última atravessa a área de estudo e corta o corpo de Mangabal Norte.

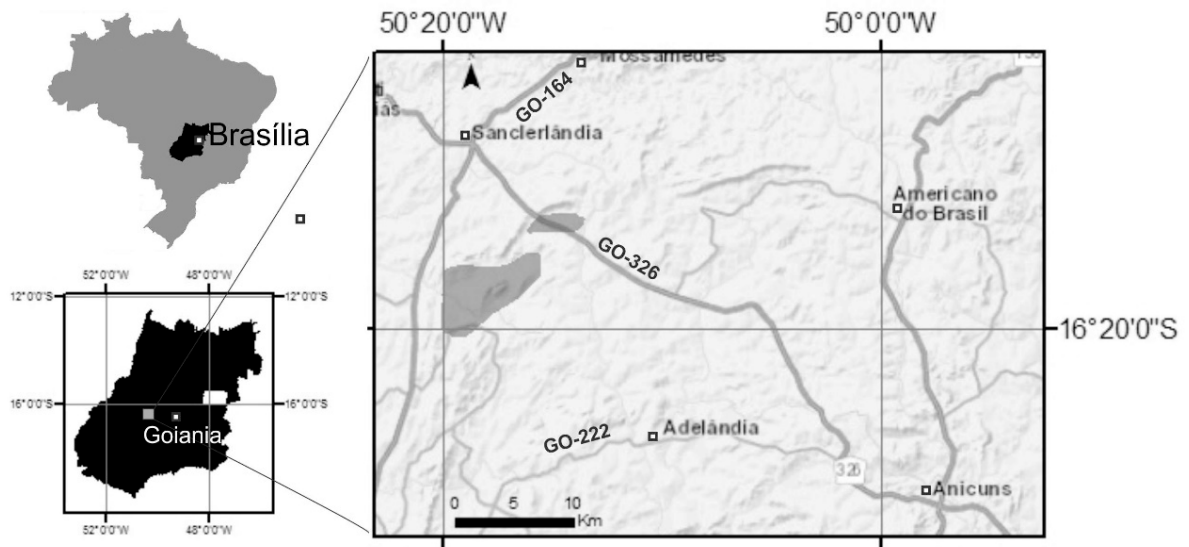


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo e principais vias de acesso. Complexo de Mangabal em evidência como polígonos escuros à sul-sudeste de Sanclerlândia.

3. Aspectos de Campo

A área de estudo abrange os dois corpos do Complexo de Mangabal. O corpo norte está localizado a 8 km a sudeste da cidade de Sanclerlândia, e o corpo sul dista 2 km a sudoeste do corpo norte. O cerrado é o bioma da área e a paisagem é caracterizada por geomorfologia marcada por morros de pequena elevação de terreno com declive suave (Fig. 2). O corpo norte possui aproximadamente 6 km² de área em superfície, com elongação preferencial Leste-Oeste. O corpo sul apresenta dimensões de 10 km por 5,5 km. Ambos apresentam contatos tectônicos com a encaixante e estão encaixados predominantemente em gnaisses tonalíticos. Os extremos norte e oeste do corpo norte apresentam contato com gnaisses tonalíticos intercalados com granada-xistos, que formam uma pequena serra – Serra de Mangabal – contornando o corpo; cianita-quartzito friável é comum ao longo deste contato.

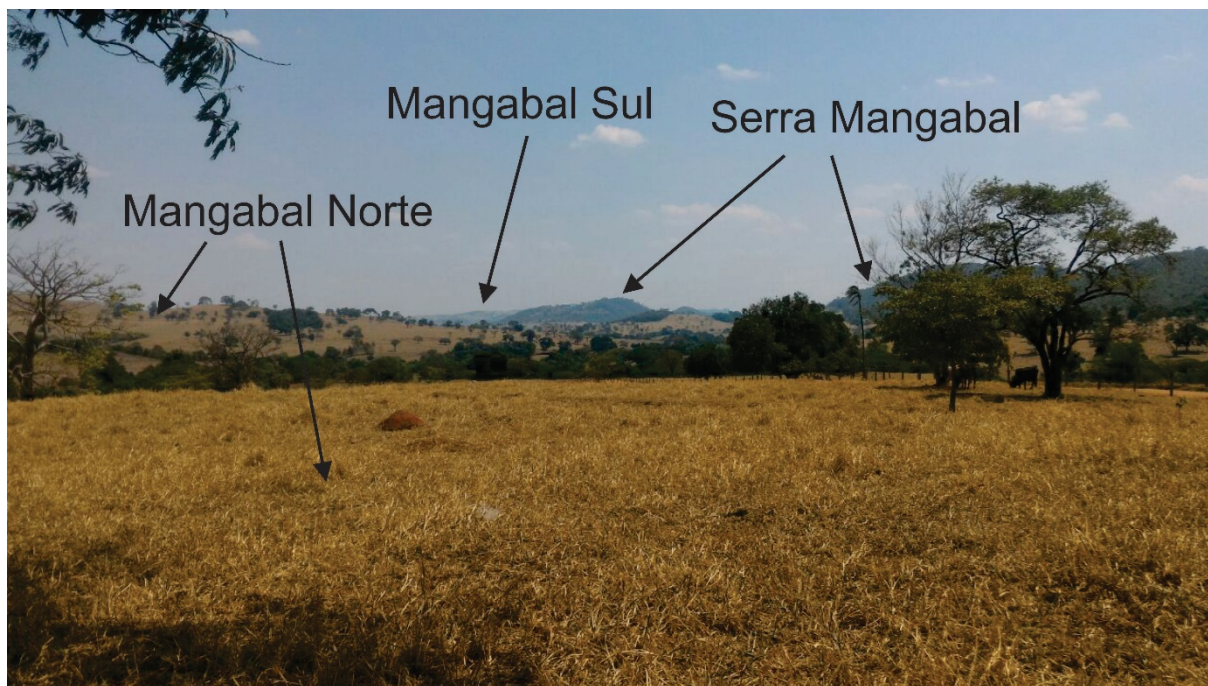


Figura 2 Paisagem da área de estudos. Foto tirado de Mangabal Norte, com vista para sul. É possível ver a Serra de Mangabal, que contorna o corpo norte e ao fundo parte do corpo sul.

O solo na região dos corpos é utilizado principalmente para criação de gado e a cobertura de solo é caracterizada por latossolos espessos. Apesar do predomínio de latossolos espessos, é comum encontrar afloramentos *in situ* e/ou em blocos e matações (Fig. 3A). Rochas ultramáficas são dificilmente encontradas preservadas ao longo do complexo e ocorrem em áreas de relevos mais arrasados. Norito e metanorito ocorrem com bastante frequência e bastante preservados. Nas porções mais elevadas de morros é possível encontrar blocos rolados de rochas máficas e rochas ultramáficas; gossans também são encontrados (Fig. 3B).



Figura 3 A) Fotografia tirada em Mangabal Norte, mostrando blocos métricos de norito. B) Foto tirada em Mangabal Sul mostrando bloco de gossan.

Rochas metamórficas foliadas comumente são encontradas em zonas de falha; nestas situações as rochas apresentam forte orientação (fig. 4). Medidas em planos de rochas foliadas apresentam duas direções preferenciais na região: Leste-Oeste e Nordeste-Sudoeste, sempre com mergulhos altos a subverticais (fig. 5). Anfibólios estirados marcam lineação proeminente nestas rochas.



Figura 4 Fotografia de anfibolito foliado.



Figura 5 Foto de afloramento de anfibolito próximo a zona de falha que marca o contato sul de Mangabal Norte. A foliação fica vertical em zona de falha, com rocha bastante alterada.

4. Geologia Regional

O Complexo de Mangabal está inserido no contexto da Faixa Brasília, no centro-oeste do Brasil. A Faixa Brasília (Fig. 6) é um dos três cinturões orogênicos que fazem parte de Província Tocantins (Almeida et al., 1981) que foram formados a partir da colisão de três blocos continentais maiores: o Cráton Amazônico, a oeste, o Cráton de São Francisco/Congo a leste e o Cráton Paranapanema a sul, este último coberto pelos sedimentos da Bacia do Paraná (Pimentel et al., 2000). A evolução da Faixa Brasília ocorreu em extenso período (900 – 600 Ma) envolvendo subducção, magmatismo e acreção de terrenos (Pimentel, 2016).

Valeriano et al. (2008) sugere a compartimentação da Faixa Brasília em cinco domínios distintos, de leste para oeste (Fig. 6): (i) zona de antepaís do paleocontinente São Francisco; (ii) zona alóctone externa; (iii) zona alóctone interna; (iv) Maciço do Goiás; e o (v) Arco Magmático de Goiás, de idade Neoproterozóica, no qual está inserido o Complexo de Mangabal.

O Arco Magmático de Goiás está localizado na extremidade ocidental da Faixa Brasília, sendo interpretado como extensa exposição de crosta continental juvenil formada entre 900 e 630 Ma (Junges et al., 2002; Pimentel and Fuck, 1992). O Arco Magmático de Goiás está limitado pelos lineamentos Rio dos Bois, Moiporá-Novo Brasil e Mossâmedes e é segmentado em duas porções: Arco de Mara Rosa, localizado na porção norte com direção NNE, e Arco de Arenópolis, localizado na porção sul com direção NNW (Pimentel et al., 1999), estando neste último inserida a área de estudo do presente trabalho. O Arco de Arenópolis é formado por unidades supracrustais e ortognáissicas as quais constituem uma crosta continental juvenil de idade neoproterozóica dispostas ao longo de faixas NNW.

Laux et al. (2005) descrevem dois eventos acrescionais neoproterozóicos no arco: o mais antigo entre 900 e 800 Ma, em contexto intraoceânico, e outro entre 660 e 600 Ma, já em ambiente de margem continental ativa, desenvolvida nos estágios mais avançados da Orogenia Brasileira. No episódio magmático mais recente do arco de Arenópolis ocorrem diversas intrusões máfico-ultramáficas, relacionadas na Fig.7. As intrusões apresentam em sua maioria características petrológicas similares, sugerindo que foram formadas de magmas parentais similares e, portanto, foram incluídas na Suíte Americano do Brasil, cuja nomenclatura advém do corpo acamadado homônimo.

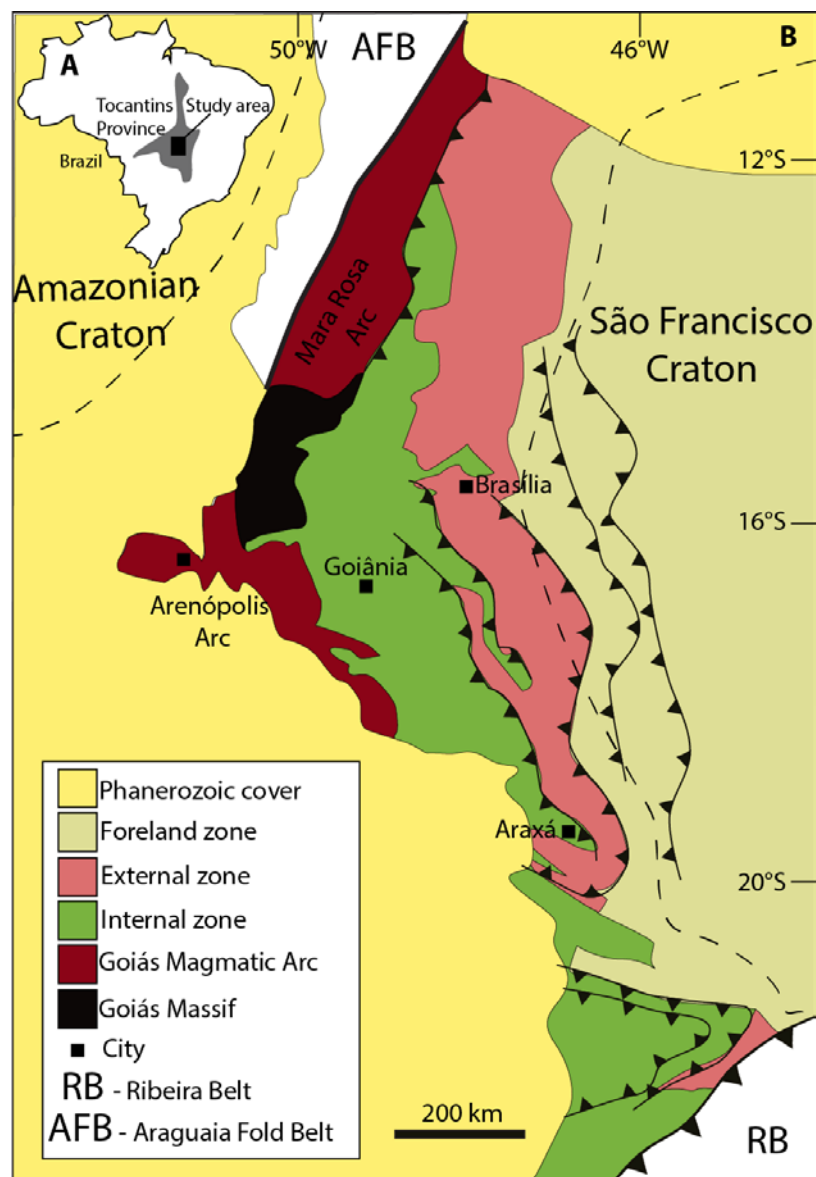


Figura 6 Mapa geotectônico esquemático da Faixa Brasília com suas compartimentações. (Modificado de Valeriano et al, 2008)

A intrusão acamadada máfico-ultramáfica de Americano do Brasil é a mais conhecida entre todas relacionadas ao Arco Magmático de Arenópolis. A intrusão porta três corpos de minério sulfetado Ni-Cu(-PGE), são eles: S2, S3 e G2, que formaram um recurso de 5Mt @ 0.62% Ni, 0.65% Cu parcialmente lavrado entre os anos de 2006 e 2013 pela empresa Prometálica Mineração.

Nesse cenário, apenas as intrusões de Córrego Seco e Santa Bárbara apresentam natureza gabro-diorítica com mineralizações de magnetita-ilmenita e podem representar intrusões cristalizadas a partir de magmas mais evoluídos (Nunes, 1990; Silva, 1991).

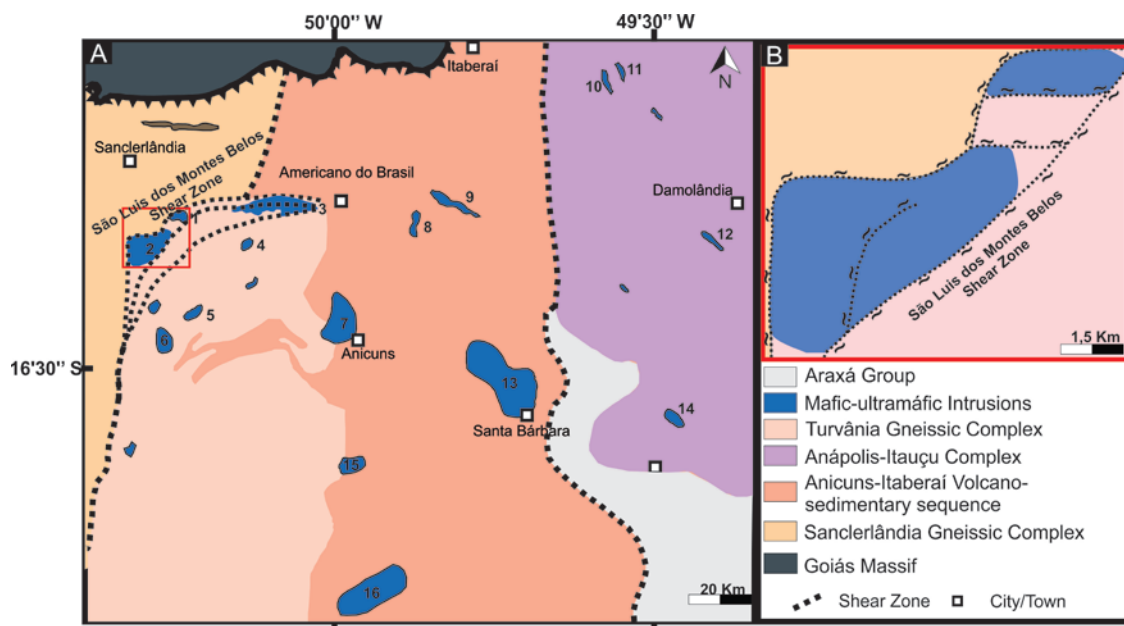


Figura 7 A) Mapa geológico simplificado do Arco de Arenópolis na região de Anicuns indicando as principais intrusões máfico-ultramáficas. 1-2 Complexo de Mangabal; 3 - Americano do Brasil; 4 - Agua Fria; 5 - Adelândia; 6 - Fronteira Norte; 7 - Córrego Seco; 8 - Aguas Claras; 9 - Capelinha; 10 - Taquaral; 11 - Santa Rosa; 12 - Damolândia; 13 - Santa Barbara; 14 - Goianira Trindade; 15 - Mata Rica e Palmito; 16 - Palmeiras. Modificado de Mota-e-Silva et al. (2011), Macedo (2016;). B) Detalhe do Complexo de Mangabal.

Foram até o momento realizados poucos estudos geocronológicos nos Complexos Mangabal e Americano do Brasil, conforme listado na tabela 1. Revela-se uma variedade de resultados analíticos devido aos diferentes minerais/rocha e aos métodos analíticos utilizados. Para o Complexo Mangabal, objeto deste estudo, somente dados K-Ar são disponíveis (Candia, 1983), porém assemelham-se aos intervalos definidos no corpo de Americano do Brasil.

Table 1 Dados geocronológicos dos Complexos Mangabal e Americano do Brasil (Dados U-Pb pelo método ID-TIMS).

Intrusion	Age	Method	Type	Material	Reference
AMB	960	K-Ar	Mineral	Hbl	Nilson, 1981
AMB	612±66	Sm-Nd	Whole-rock	-	Nilson et al, 1997
AMB	631±9	U-Pb	Mineral	Zr	Hollanda et al, 2003
AMB	616±81	Sm-Nd	Whole-rock	-	Hollanda et al, 2003
AMB	626±8	U-Pb	Mineral	Zr	Laux et al, 2004
MC	815±25	K-Ar	Mineral	Plg	Candia, 1983
MC	610±9	K-Ar	Mineral	Ms	Candia, 1983
MC	612±8	K-Ar	Mineral	Hbl	Candia, 1983

AMB - Americano do Brasil Complex; MC - Mangabal Complex
Hbl - Hornblende; Zr - Zircon; Plg - Plagioclase; Ms - Muscovite

5. Estudos Anteriores

O mapeamento geológico do Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília em 1969 foi pioneiro no reconhecimento de corpos máfico-ultramáficos a sudeste da Serra Dourada. Em 1973, Danni et al. cartografaram corpos os quais denominaram de Maciço de Mangabal, localizado ao sul da Serra Dourada, e Maciço de São João (atualmente conhecido como Complexo Americano do Brasil). Neste trabalho, Danni et al. englobam os dois corpos de Mangabal como um único corpo máfico-ultramáfico contínuo. Já Ribeiro et al. (1974) apresentam um estudo mais específico sobre Mangabal I (membro norte), mostrando que nesta data já se tinha conhecimento de serem dois corpos não ligados na superfície.

Na década de 80, Danni e Fuck (1981) e Danni et al. (1982) apresentam uma análise regional da Faixa Brasília, e interpretam Mangabal I e II, em conjunto com outras intrusões como Americano do Brasil, Adelândia e Fronteira Norte, como corpos formados no Proterozóico Inferior, intrusivos no Bloco Granulítico de Goiás, constituinte do embasamento.

Danni e Teixeira (1981) propõem uma sistematização das associações de rochas máficas-ultramáficas de Goiás, citando Mangabal I e II. Pfrimer et al (1981) apresentam uma análise preliminar da geologia e mineralizações do complexo.

Candia (1983), em sua tese de doutorado, estende o trabalho de Pfrimer et al (1981). Segundo Candia (1983) ambos os complexos estão encaixados em rochas de um mesmo embasamento síalico e afirma ainda, com base em interpretações de dados geofísicos e petrológicos, que os complexos não são interligados em subsuperfície e que apresentam diferenças entre si. A autora descreve que o corpo apresenta duas etapas de evolução distintas: uma de cristalização ígnea e outra posterior relacionada ao metamorfismo e deformação dos complexos e que, embora possivelmente estejam vinculados a um mesmo episódio magmático, as evidências geofísicas e dados petrográficos indicavam dois complexos com câmaras magmáticas separadas e evoluções magmáticas próprias.

Candia (1983) descreve sequências de cristalização distintas para os complexos. Mangabal I apresenta três sequências cumuláticas principais: olivina-cromo espinélio cumulos, olivina-plagioclásio cumulos e piroxênio-plagioclásio cumulos. Já Mangabal II apresenta sequência de cristalização: olivina-cromo espinélio cumulos, bronzita-cumulos, olivina-plagioclásio cumulus e piroxênio-plagioclásio cumulos. Além disso, as condições de pressão e temperatura

dos corpos são delimitadas entre 700°C a 780°C e 6,0 a 6,5 kbar respectivamente. Candia (1983) não estabeleceu ambiente tectônico dos corpos.

6. Justificativa do Estudo

Embora o Complexo de Mangabal seja conhecido desde a década de 60, os últimos estudos nessa ocorrência foram realizados na década de 80. A relação entre os dois corpos, se representam um conjunto ou se são intrusões completamente distintas, tem permanecido desde seu descobrimento. Este trabalho foi motivado principalmente para atualizar o estudo sobre o complexo, tentando relacionar e/ou delimitar as distinções entre as intrusões.

Além de Mangabal, diversas dessas intrusões foram identificadas em pesquisas geoquímicas e/ou geofísicas de exploração, mas mapeamento mais detalhado e estudos petrológicos são até agora limitados a algumas intrusões, como Americano do Brasil (Nilson, 1981; Nilson et al 1986; Mota e Silva, 2009), Damolândia (Della Giustina, 2010; Maia, 2016), Taquaral (Della Giustina, 2010) e Santa Bárbara (Silva, 1991). Estudar mais uma dessas intrusões ajudará na compreensão do intenso magmatismo máfico-ultramáfico neoproterozóico do Arco Magmático de Goiás.

O Complexo máfico-ultramáfico de Americano do Brasil é o mais conhecido e estudado dentre todas as intrusões máfico-ultramáficas do Arco de Arenópolis pelos seus depósitos de níquel, cobre e cobalto. O complexo de Americano do Brasil é conhecido desde a década de 60, com trabalhos de prospecção sendo desenvolvidos desde 1973 até abertura de mina subterrânea, que operou de 2006 a 2008, para exploração de níquel, cobre e cobalto. Trabalhos mais detalhados de caracterização da petrografia do corpo e mineralizações foram realizados por Nilson (1981), Nilson et al (1986), Mota-e-Silva (2009) e Mota-e-Silva et al (2011). O Complexo de Americano do Brasil está localizado a 10 km de distância a leste do Complexo Mangabal. Além da proximidade, imagens geofísicas (exemplo na fig. 8) e de satélite apresentam uma estrutura leste-oeste de grande porte que conectam ambos complexos.

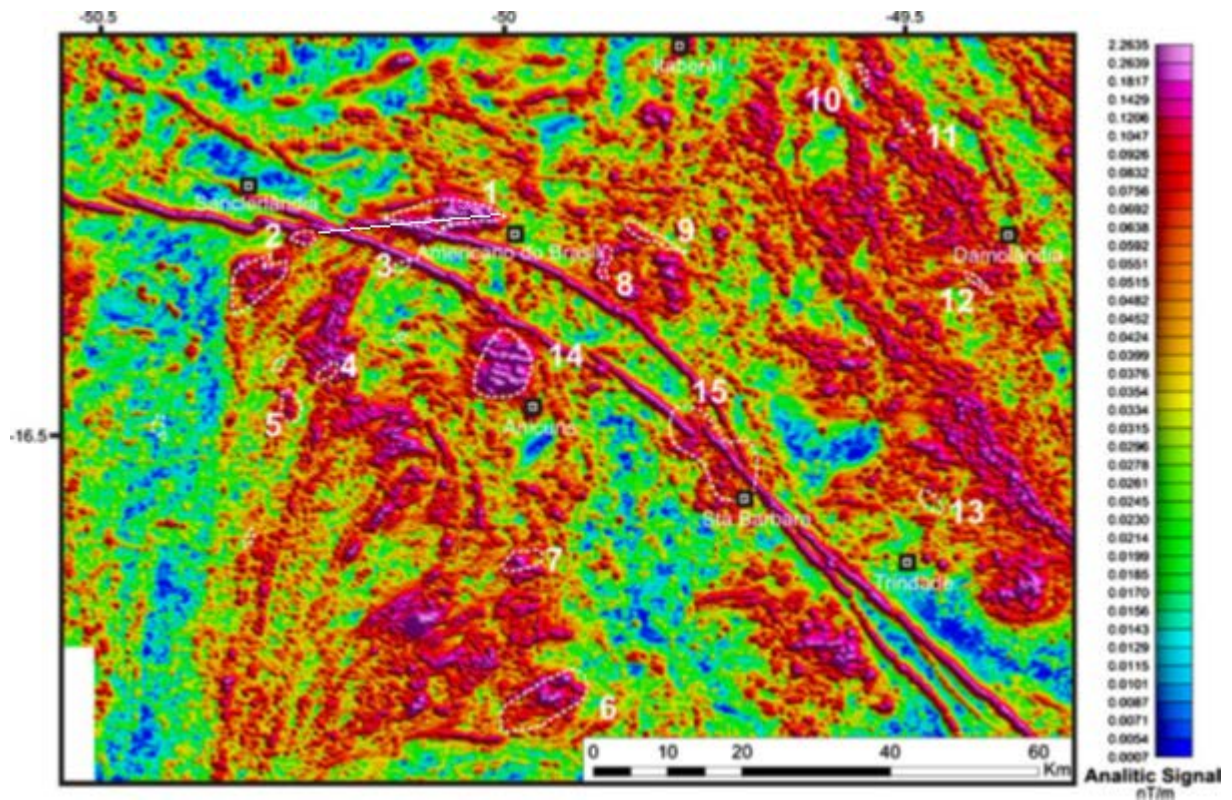


Figura 8 Analytical signal amplitude (nT/m). Modificado de Mota-e-Silva et al 2011. Legenda: 1 Americano do Brasil, 2 Complexo Mangabal, 3 Água Fria, 4 Adelândia, 5 Fronteira Norte, 6 Palmeiras, 7 Mata Rica e Palmito, 8 Água Claras, 9 Capelinha, 10 Taquaral, 11 Sta Rosa, 12 Damolândia, 13 Goianira–Trindade, 14 Córrego Seco, 15 Santa Bárbara. As linhas pontilhadas indicam aproximadamente o limite das intrusões e a linha contínua a estrutura que liga os corpos.

Além do mais, embora a maioria das intrusões acamadadas que possuem Ni-Cu-EGP estejam localizadas em crátons estáveis, importantes depósitos de Ni-Cu(\pm EGP) têm sido encontrados em cinturões orogênicos. Como exemplo pode se citar Nebo-Babel (Baker and Waugh, 2005) e Nova (Maier et al., 2016) na Austrália, Aguablanca na Espanha (Casquet et al., 2001; Tornos et al., 2001), Portneuf-Domain no Canadá (Poirier, 1998; Sappin et al, 2009).

Como são poucas as intrusões conhecidas em ambientes orogênicos, em relação as encontradas em crátons estáveis, estudar o Complexo Mangabal pode contribuir para o melhor entendimento deste tipo de intrusão e possibilitar, assim, a investigação do potencial prospectivo do complexo.

CAPÍTULO 2 –

Magmatic Evolution and Metamorphism of the Neoproterozoic Mangabal Complex, Central Brazil: implications for syn-tectonic Ni-Cu-PGE mineralized intrusion

1. Introduction

Magmatic Ni-Cu-PGE deposits are usually associated with mafic and ultramafic rocks. This kind of deposits mostly occur in extensional tectonic settings (Naldrett, 2004), with only few examples known from compressional settings (e.g. Aguablanca in Spain, Casquet et al. 2001, Tornos et al. 2001; Intrusions in Tati and Selebi-Phikwe belts, Maier et al, 2008; Portneuf-Domain in Canada, Poirier 1998, Sappin et al. 2009).

The syn-orogenic intrusions are less common than those occurring in anorogenic or distensive tectonic settings and are usually small-sized (up to 40 km²) (Jesus et al, 2014). These are thought to have derived from hydrous, tholeiitic to (calc-) alkaline basalts that represent the roots of continental and island arc magmatism (Jesus et al, 2014). There are no determinant petrographic characteristics to distinguish syn-orogenic intrusions from those occurring in anorogenic or distensive tectonic settings. The geologic context and the structural features will help to determinate the context of the intrusion. Some trace-geochemistry studies can help to determinate the arc-related intrusions, as for example it can be characterized by enrichment in LILE relative to HFSE (e.g. Nb, P, Zr, Ti, Y), and LREE relative to HREE, which are geochemical characteristics of the arc-type environment (Azer et al, 2016). Chemistry of igneous amphibole, spinel and clinopyroxene can be used to compare with others in similar geological settings (e.g. Beard and Barker 1989, Irvine 1967, Louckes 1990)

The Brasilia Belt, a complex Neoproterozoic orogen, is located in the centre of Brazil. It is divided into several parts, one of these called Arenópolis Arc. It contains several small- to medium-sized mafic-ultramafic layered intrusions, being potential for Ni-Cu-(PGE) mineralization. The geodynamic setting of the emplacement associated with their formation remains poorly clarified.

The Mangabal Complex is part of these several intrusions and will be described in this work. Previous studies of the Mangabal Complex provided some geological and petrographic

descriptions of the Complex (Pfrimer et al. 1981; Candia, 1983; Candia and Girardi, 1985), but in this work, we will reinterpret the Complex based on the new petrology and mineral chemistry data using new drill-core samples. In this paper, we intend to understand the petrologic evolution and metamorphism conditions of the Mangabal Complex.

2. Geological Setting

The area of study is located in the Midwest of Brazil, in the Goiás State, in the geological context of the Neoproterozoic Tocantins Province (Almeida et al. 1981). The Tocantins Province consists of three orogenic belts formed due to the collision of three major continental blocks: the Amazonian, to the west, the São Francisco/Congo, to the east, and the Paranapanema Block, to the south, the latter covered by sedimentary rocks of the Phanerozoic Paraná Basin (Pimentel et al., 2000a). The Brasília Belt developed as the result of an island arc accretion and continental collision between the Amazonian and São Francisco-Congo paleocontinents and, corresponds to a global convergent episode that resulted in the final amalgamation of the Gondwana Supercontinent (Pimentel, 2016). The evolution of the Brasília Belt occurred over a long period (900 – 600 Ma) involving subduction, magmatism and terrain accretion (Pimentel, 2016).

The Brasília Belt is divided into five main domains, from east to west (Fig. 9): (i) the foreland zone, characterized by anchimetamorphic sub-horizontal thrust-sheets of Neoproterozoic carbonatic platforms; (ii) the external zone, represented by rift-to-passive margin metasedimentary rocks; (iii) the internal zone, representing the metamorphic core of the Brasília Belt; (iv) the Goiás Massif, interpreted as a microcontinent/exotic block accreted to the orogen at the end of the Neoproterozoic, and (v) the Goiás Magmatic Arc, which represents a juvenile terrain cropping out in the westernmost part of the belt (Valeriano et al, 2008).

The Goiás Magmatic Arc (Dark Red in Fig. 9) is composed of plutonic and supracrustal rocks (Valeriano et al, 2008). It represents a multi-stage evolution terrain formed due to the accretion of older (ca. 930 – 800 Ma) intraoceanic island arc(s) and the subsequent development of evolved continental arcs between 660 to 600 Ma (Pimentel, 2016).

The arc rocks crop out in two branches recording distinct geological trends but similar geology, known as the Arenópolis Arc to the south, with an NNW-SSE trend, and the Mara Rosa Arc to the north, showing an NE-SW orientation (Pimentel and Fuck, 1992; Pimentel et

al., 1997). The Mara Rosa Arc is well reported in the literature, mainly because of the widespread occurrence of gold mineralization, which forms world-class deposits such as the Chapada mine (Oliveira et al., 2015). On the contrary, the Arenópolis Magmatic Arc is poorly studied and still lacks both basic geology as well as isotopic and geochronological data.

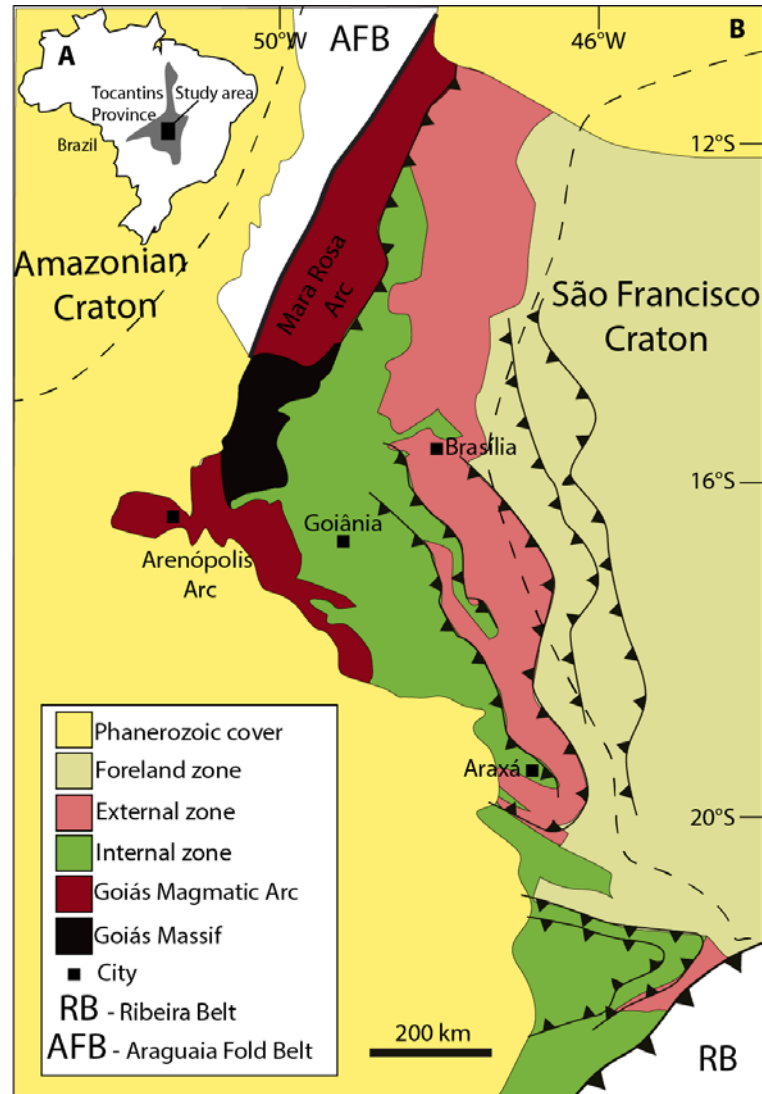


Figura 9 Schematic map of the Brasília Belt. Modified from Valeriano et al, 2008.

Laux et al. (2004; 2005) present a comprehensive study of orthogneisses and mafic-ultramafic intrusions in the Arenópolis Arc. Based on U-Pb zircon data, these authors suggest that the igneous activity in that area took place in two episodes, between ca. 880 and 800 Ma,

probably in an intraoceanic setting, and between ca. 660 and 600 Ma, likely in an active continental margin at the end of the Brasiliano Orogeny.

In the Arenópolis Arc, several syn-tectonic mafic-ultramafic intrusions were emplaced into the juvenile, ca. 800 Ma orthogneisses (fig. 10). Due to the similar petrological signature, they were interpreted as crystallized from similar parental magmas and, thus, they were combined into the Americano do Brasil suite (Mota-e-Silva et al., 2011). Only two intrusions (Córrego Seco and Santa Barbara) have a gabbro-dioritic nature and may represent intrusions crystallized from more evolved parental magmas (Mota e Silva, 2009). The age of the Ni–Cu±PGE-bearing intrusions in the Arenópolis Arc ranges between 626 to 612 Ma (Gioia, 1997; Laux et al., 2004; Pimentel et al 2004; Mota e Silva 2009).

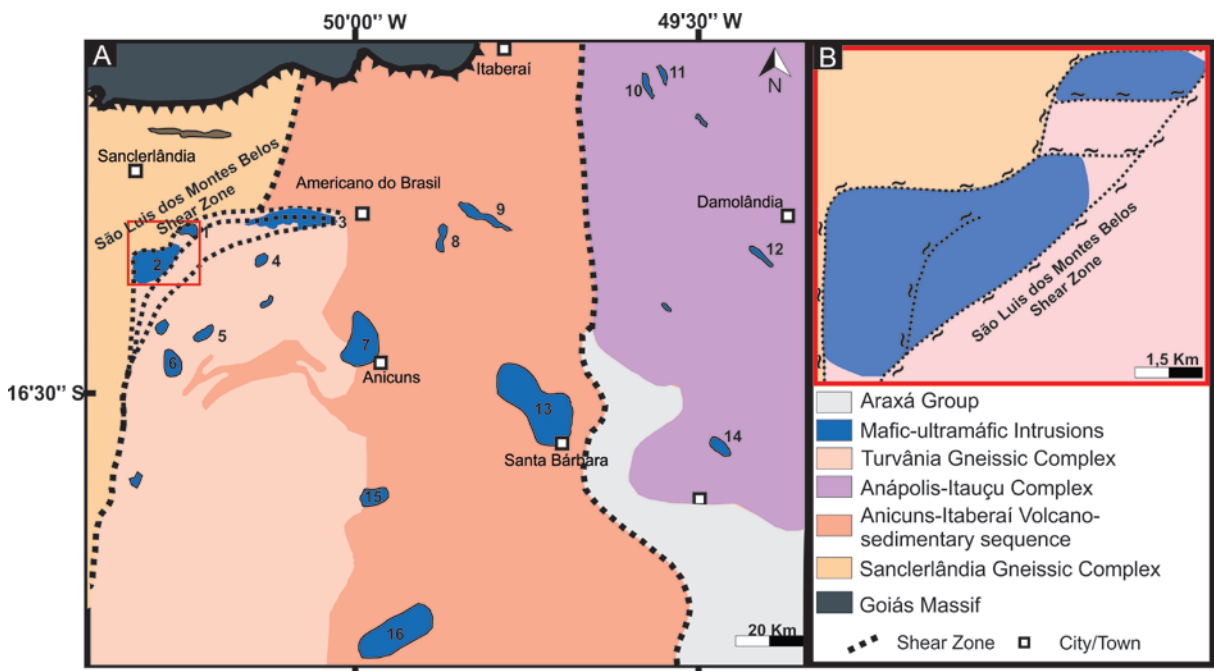


Figura 10 – Simplified geological map showing the orogenic 600 – 630 Ma mafic and mafic-ultramafic (MUM) intrusions. 1-2 Mangabal Complex; 3 - Americano do Brasil; 4 - Agua Fria; 5 - Adelândia; 6 - Fronteira Norte; 7 - Córrego Seco; 8 - Aguas Claras; 9 - Capelinha; 10 - Taquaral; 11 - Santa Rosa; 12 - Damolandia; 13 - Santa Barbara; 14 - Goianira Trindade; 15 - Mata Rica e Palmito; 16 – Palmeiras. Modified from Macedo, 2016 and Mota-e-Silva et al, 2011.

Several geochronological studies were done on Mangabal and Americano do Brasil complexes as shown in table 2. These ages keep doubts about their meanings due to divergences about ages and the material that was analyzed. Some metamorphic minerals and rocks may have been analyzed but the ages interpreted as ages of crystallization, while they mean metamorphic data that throw bodies.

Table 2 Geochronological ages for Americano do Brasil and Mangabal Complexes.

Intrusion	Age	Method	Type	Material	Reference
AMB	960	K-Ar	Mineral	Hbl	Nilson, 1981
AMB	612±66	Sm-Nd	Whole-rock	-	Nilson et al, 1997
AMB	631±9	U-Pb	Mineral	Zr	Hollanda et al, 2003
AMB	616±81	Sm-Nd	Whole-rock	-	Hollanda et al, 2003
AMB	626±8	U-Pb	Mineral	Zr	Laux et al, 2004
MC	815±25	K-Ar	Mineral	Plg	Candia, 1983
MC	610±9	K-Ar	Mineral	Ms	Candia, 1983
MC	612±8	K-Ar	Mineral	Hbl	Candia, 1983

AMB - Americano do Brasil Complex; MC - Mangabal Complex

Hbl - Hornblende; Zr - Zircon; Plg - Plagioclase; Ms - Muscovite

3. Sampling and analytical procedures

For this study, several outcrop rocks samples and 48 drill core samples from exploration boreholes were systematically sampled in a way to better represent the stratigraphy of the complex. Forty-five polished thin sections and eleven polished sections were examined under petrological transmitted/reflected light polarizing microscopes. A scanning electron microscope assisted the identification and location of sub-micrometric minerals noble metals, performed using an FEI Quanta 450. All the laboratory and analytical procedures were done at the University of Brasília.

Mineral chemistry was determined on polished thin sections to analyze olivine, orthopyroxene, plagioclase, spinel, amphibole, garnet and kyanite. These analyses were done using a JEOL JXA-8230 SuperProbe with 5 wavelengths dispersive (WDS) spectrometers in the Electron Microprobe Laboratory of the University of Brasília (Brazil). Additionally, energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) of several minerals was also performed to support petrographic studies.

Sm-Nd analyses were carried out in 6 whole-rock samples of the ultramafic zone, three from northern limb and three from southern limb. The analyses were done in the Geochronology Laboratory of the University of Brasília, according to the procedures described by Gioia and Pimentel (2000).

4. Geology of the Mangabal Complex

The Mangabal Complex is a Ni-Cu-(PGE)-bearing layered mafic-ultramafic complex located in the central part of the Arenópolis area. It is located within the São Luis dos Montes Belos Shear Zone, near the contact between the Sanclerlândia and Turvânia blocks. This scenario, consequently, implies in a heterogeneous metamorphism overprinting, both on the host rocks and in the Mangabal Complex rocks. Despite that, the complex still partially preserves the original igneous texture and mineralogy.

The Mangabal Complex includes two bodies (northern limb and southern limb) cropping out with a sigmoidal morphology (Fig. 10-B). The Northern limb is smaller, covering around 6 km² in the surface, whereas the southern limb, distant around 2 km to the south, measures c.a. 10 km in length and 5.5 km in width. Both bodies comprise a basal ultramafic sequence underlying a thick mafic interval (Fig. 11). Extensive mapping and mineral exploration data carried out by VM Metais provided constraints on the geology and stratigraphy of the Mangabal Complex (Fig. 10b, 11).

The Mangabal Complex is subdivided into three zones, based on the different type and/or proportion of cumulus minerals: the Lower Mafic Zone (LMZ), the Ultramafic Zone (UZ) and the Upper Mafic Zone (UMZ). The nomenclature of the rocks follows the Irvine (1982) terminology for layered intrusions, but oikocrysts which show evidence to be partially coexistent with the cumulus phases were also considered in the nomenclature.

4.1. Igneous Rocks

The northern and the southern limbs are similar and hold the same features, is here described together. Massive coarse- to medium-grained gabbroic rocks prevail in the Mangabal Complex, but dunite and harzburgite also occur.

The basal ultramafic rocks are predominantly orthocumulates, whereas the mafic rocks are adcumulates or mesocumulates. Commonly, mafic and ultramafic rocks show partially or well-preserved igneous textures with primary olivine, orthopyroxene and plagioclase. The stratigraphy of the complex is displayed on Fig.11.

Lower Mafic Zone

The Lower Mafic Zone is only described in the Southern Limb, probably due to the fact that the drill holes in this body are deeper. *The norite* is the only igneous rock of this zone and represents the basal portion of the magma chamber. It is a light bronze-coloured, medium-grained, essentially olivine-free, ad- to meso-cumulate rock composed of orthopyroxene (bronzite) and plagioclase (Fig. 12-A). Clinopyroxene oikocrysts occur sporadically but are almost completely replaced by metamorphic hornblende, keeping only the cores preserved. The rock consists of 30 to 40 vol % euhedral prismatic bronzite grains up to 3mm in size. When enclosed by clinopyroxene oikocrysts, bronzite displays subhedral crystals being partially transformed to amphibole. Plagioclase commonly occurs as subhedral to euhedral laths ranging from 45 to 50 vol%. Sulfides as pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite occur as disseminated grains (less than 2% vol).

Ultramafic Zone

The Ultramafic Zone consists of dunite and harzburgite. The transition between orthocumulate dunite to adcumulate harzburgite is commonly gradational and results from the continuous upward increase in orthopyroxene content. The original contact with the Lower Mafic Zone is not preserved, being completely transformed to amphibolite.

The dunite consists of a medium-grained, holocrystalline, melanocratic and orthocumulate rock (Fig.13-A) composed of cumulus olivine and chromium-spinel (Fig. 12-B). Olivine forms sub-rounded crystals with up to 1.5 mm in diameter and representing up to 80% vol. It forms commonly well-preserved crystals. Euhedral chromium-spinel is smaller (less than 0.1mm), usually displaying a cubic form and does not exceed 2% vol. Orthopyroxene, clinopyroxene, and plagioclase are intercumulus phases, occurring respectively in this order of abundance. Phlogopite and sulfides are interstitial accessory minerals. Where olivine is in contact with plagioclase, corona textures are developed.

The harzburgite is a medium- to coarse-grained olivine and pyroxene cumulate showing meso- to orthocumulate texture (Fig. 12-C); olivine and orthopyroxene modal compositions range around 40-50 vol% each. Matrix olivine exhibits medium-grained equigranular subhedral morphology and annealing texture, whereas when it occurs as inclusions in pyroxene, olivine is fine-grained. Plagioclase can appear as intercumulus phase, an accessory to trace mineral. Where olivine is in contact with plagioclase, corona textures are developed. The corona is composed of orthopyroxene in the inner zone and the outer border consist of a symplectic

intergrowth of green spinel (hercynite) and amphibole of a pargasitic composition. In a few cases the corona is so developed that plagioclase and/or olivine are totally transformed by the corona-forming reactions.

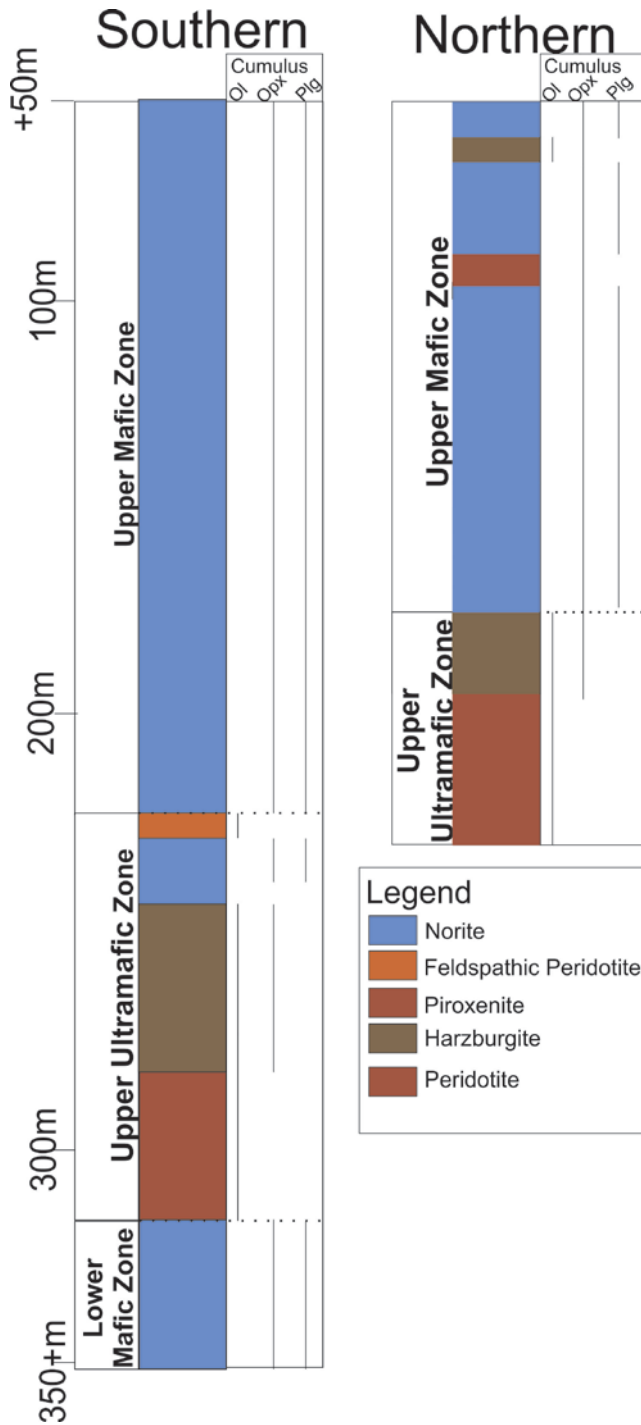


Figura 11 Stratigraphy of Northern and Southern Limb of Mangabal Complex.

Upper Mafic Zone

The norite is the more abundant rock of this zone (Fig.13-B), with minor gabbro-norite as well as limited lenses of feldspathic dunite. The norite is a medium-grained orthopyroxene (bronzite) and plagioclase ad- to mesocumulate rock. It is an olivine-free rock. Cumulus bronzite consists of euhedral prismatic grains up to 3mm in size. Plagioclase laths are euhedral (ca. 2mm). In some intervals, it is possible to observe a discrete orientation of the crystals. The intercalation of minerals is visible in some portions, characterized by millimetric layers of bronzite and plagioclase layers are noticed (Fig. 12-D). The amount of plagioclase and bronzite varies, but it is similar in most of the rocks (around 30 to 60 vol% each). Coarse-grained anhedral augite oikocrysts, up to 2 cm in size, englobe the euhedral and cumulate crystals in isolated portions. Apatite and disseminated sulfides occur as an accessory and interstitial minerals. It is not uncommon that the quantity of bronzite increase so much that the rock reaches pyroxenite composition (no plagioclase) in isolate portions.

The feldspathic dunite consists mainly of cumulate olivine in orthocumulatic texture (Fig. 12-E). Medium sized grains of olivine, measuring up to 2,5 mm, are typical sub-rounded, but some crystals show resorption textures with plagioclase, the major intercumulus phase and, thus, olivine is clearly not in equilibrium with the interstitial liquid. Clinopyroxene always appears in contact with olivine, growing probably as a result of an interaction between olivine and an intercumulus liquid. Where olivine is in contact with plagioclase, corona textures are variably developed, similarly to previously described. The corona rim around olivine crystals (Fig. 12-F) are composed of orthopyroxene and an outer zone of amphibole (mainly pargasitic composition). At this zone, the intercumulus plagioclase increases such that the olivine cumulate can be classified as an olivine gabbro or troctolite (modal based).

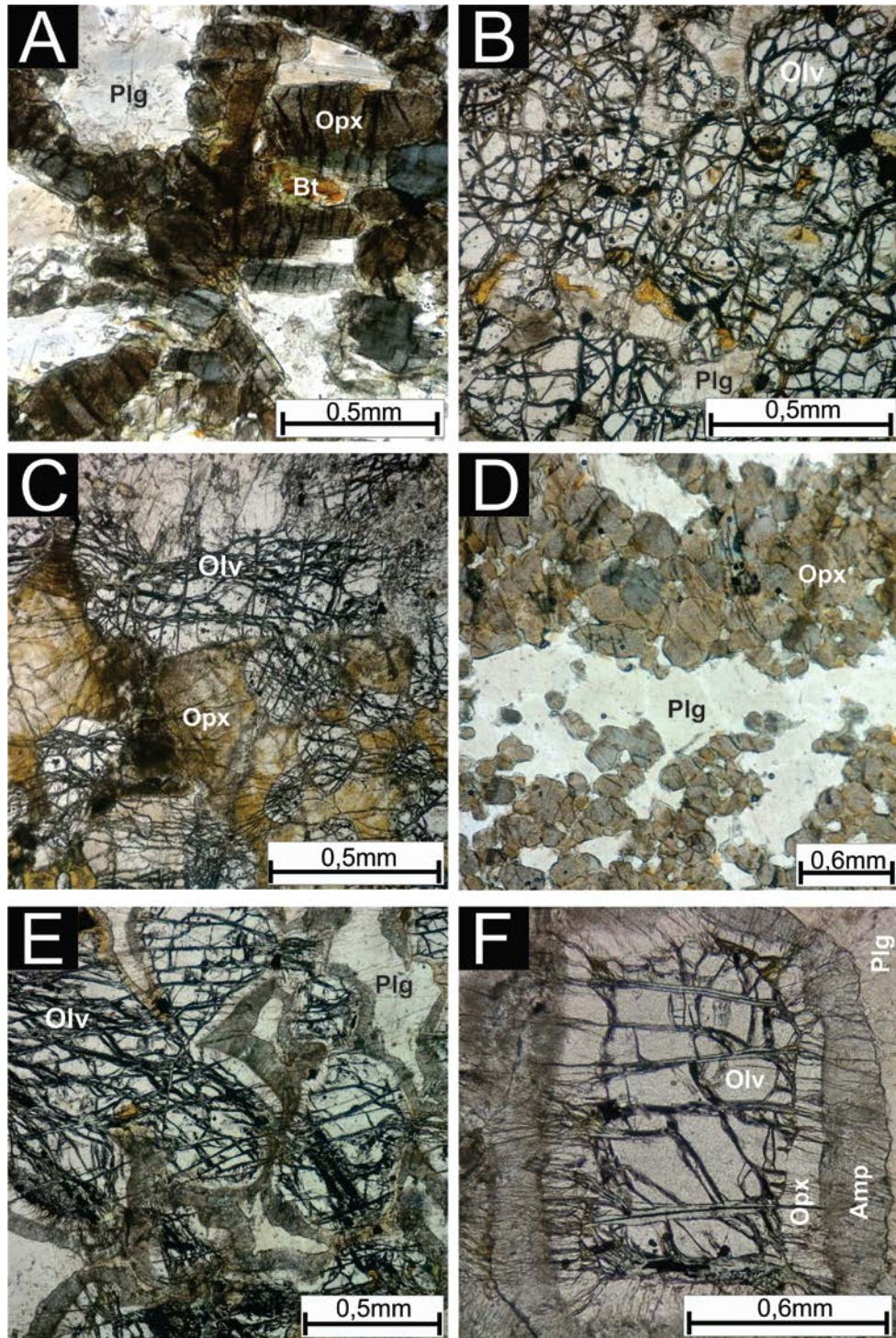


Figura 12 Photomicrographs of major rock types from the Mangabal Complex. (A) Typical bronzite-plagioclase in norite of Lower Mafic Zone. (B) The typical cumulate texture of olivine on dunite. On the picture is possible to note small euhedral to subhedral cr-spinel. Plagioclase, Orthopyroxene and phlogopite on interstitial spaces. (C) The typical poikilitic texture of orthopyroxene enclosing olivine and coexistent with olivine. (D) The typical interlayer of plagioclase and bronzite on norite. (E) Olivine cumulate of feldspathic dunite, plagioclase is a common intercumulus phase. (F) Detailed olivine with the double rim, an inner shell of polycrystalline orthopyroxene and an outer zone of amphibole

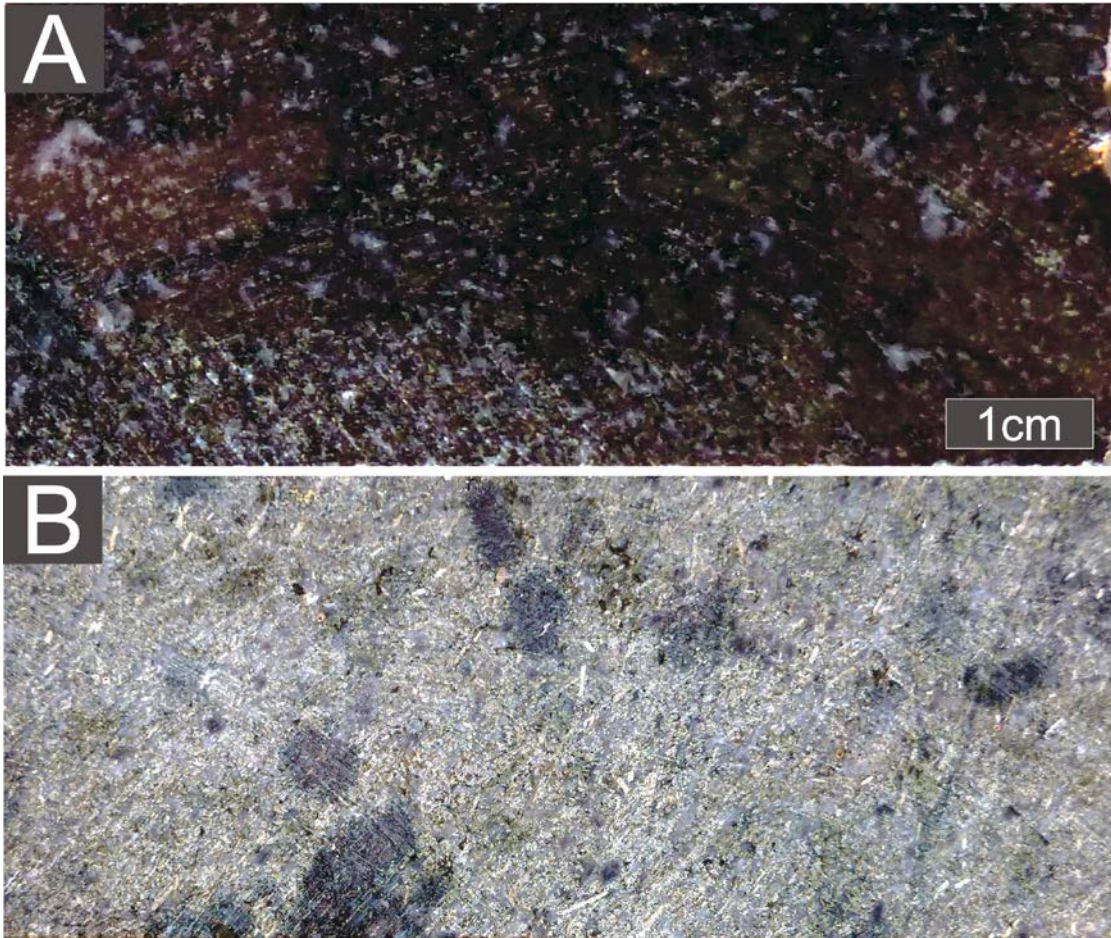


Figura 13 Drill core of igneous rocks. A. Dunite of the ultramafic zone. B. Norite of the upper mafic zone.

4.2. Metamorphic Rocks

Metamorphic assemblages partially replace primary igneous minerals of the Mangabal Complex. This metamorphic alteration is heterogeneous and characterized by extensive hydration that usually preserves primary textures (Fig14-A). However, the transition between igneous phases and metamorphic minerals is documented in different scales and intensity throughout the complex. Felsic veins with quartz, kyanite and feldspar are common on more deformed zones (Fig.14-B).

Metamorphic rocks occur following the directions of principal deformation of the body, always coinciding with the regional shear zones. The most altered rocks are medium-grained, foliated to non-foliated, pegmatoidal amphibolite that consist of magnesium-hornblende, plagioclase and biotite as the main mineralogy. The proportion of each mineral varies along the complex, but amphibole is always more abundant than plagioclase and biotite. The main texture of the rocks ranges from diablastic to nematoblastic (Fig. 15-A), depending on the proximity of

shear zones. Quartz, rutile, titanite, apatite and orthoamphibole are common accessory minerals. An important accessory mineral on the amphibolite, never described in the complex before, is kyanite (Fig. 15-B). Poikiloblastic kyanite appears in equilibrium with magnesium-hornblende and plagioclase. When kyanite appears, quartz and carbonate are common accessory minerals. Anthophyllite can occur in some samples but develops more commonly in ultramafic rocks.

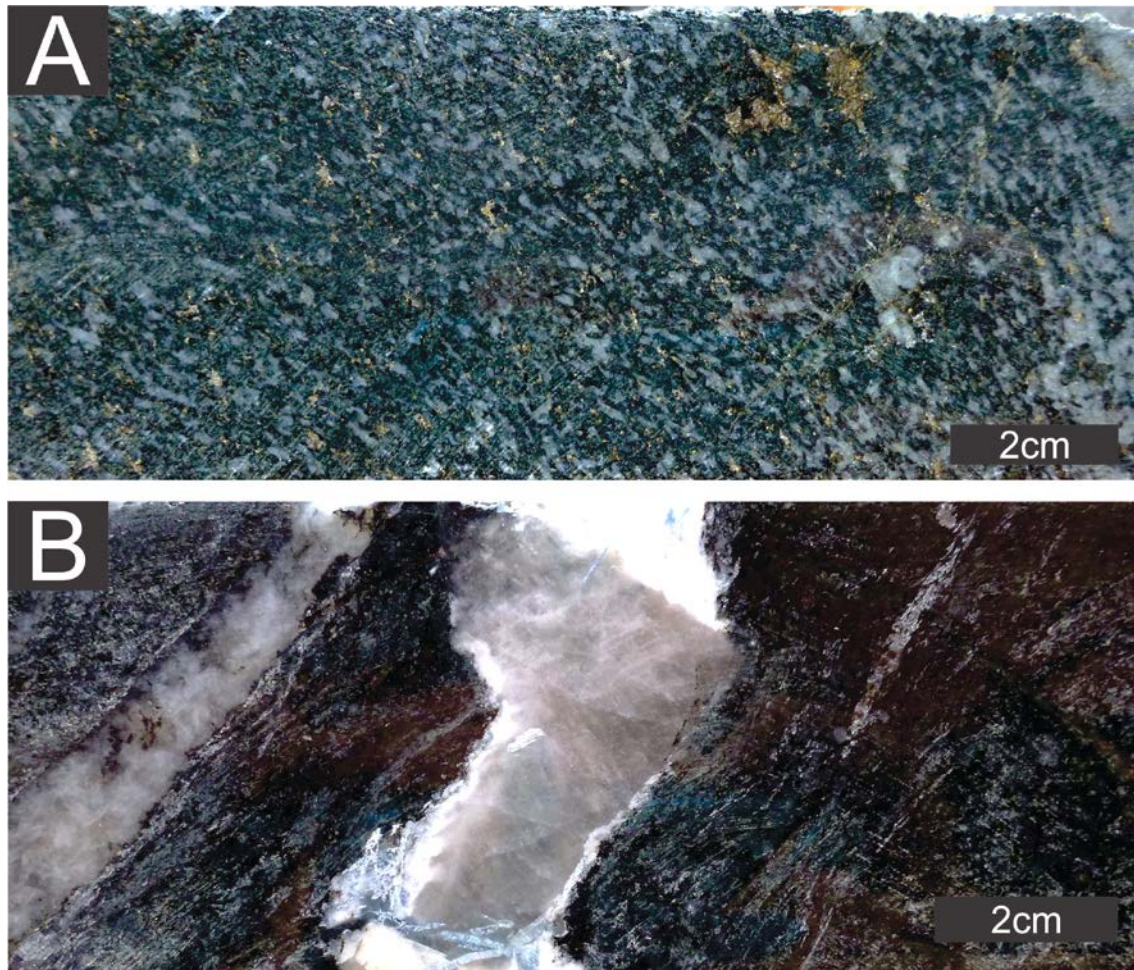


Figura 14 Example of drill-core rocks of metamorphic rocks of Mangabal Complex. A. Amphibolite preserving norite texture. B. Amphibolite with the kyanite-quartz vein.

The Ultramafic Zone rocks, when metamorphosed, are transformed to coarse to medium-grained anthophyllite-amphibolite. These rocks have diablastic to nematoblastic texture, depending on the proximity to shear zones. The main minerals are euhedral anthophyllite and subhedral to euhedral hornblende. The proportion of amphiboles ranges from 60 to 95 vol%, usually similar in volume each. Granoblastic plagioclase has varying amounts from 2 to 35%, depending on the initial igneous rock. Biotite, sulfides and oxides are common minerals. Some

metanorite, both in the southern and northern limb, can show a distinctive feature of a corona reaction around the orthopyroxene, forming by amphibole gedrite that forms acicular and symplectitic texture around pyroxenes.

Shear-zones crosscutting the Mangabal Complex show calcium-iron-silica rich compositions, resulting in a mineralogical diversity on these deformed zones. Hornblende, plagioclase, biotite and sulfide are always present in these zones. Considerable amounts of porphyroblastic garnet, epidote, scapolite and muscovite also appear as accessory minerals. Chlorite and carbonate occur as localized later alteration phases.

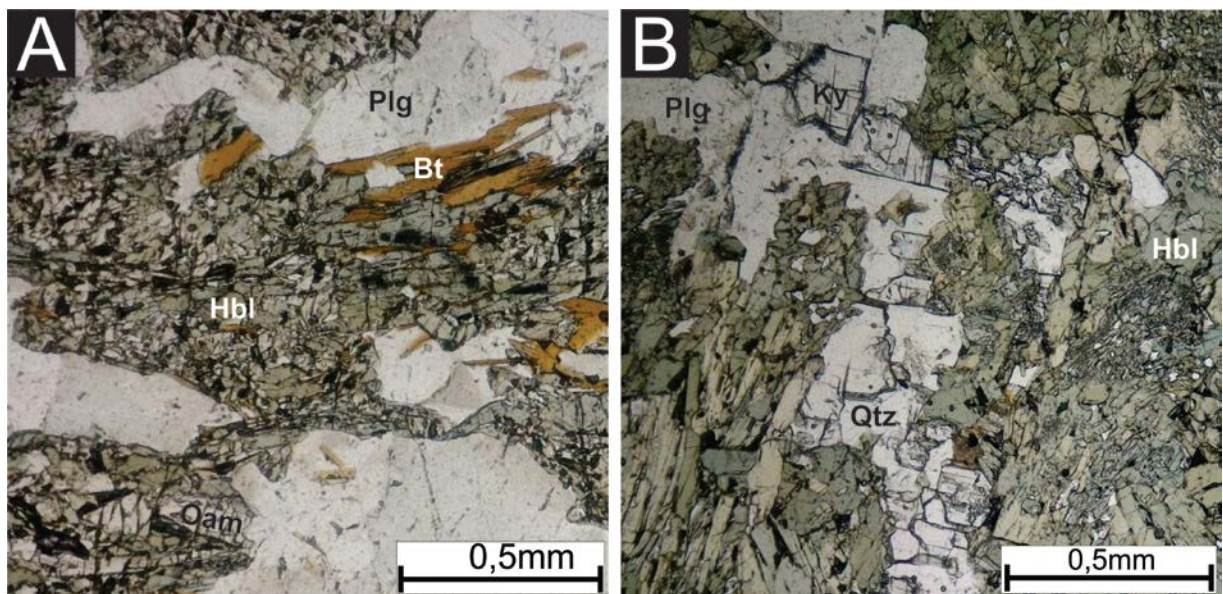


Figura 15 Photomicrographs of amphibolite of the Mangabal Complex. (A) Typical amphibolite in granoblastic texture. Magnesium-hornblende, anthophyllite and biotite in an in a preferred direction and plagioclase on granoblastic texture. (B) Typical Kyanite-Amphibolite. Major grain of Kyanite (upper than 1,5mm) in optical continuity, between quartz, amphibole and plagioclase.

4.3. Mineralization

The mineralization of Mangabal Complex is divided into two: igneous and metamorphic mineralization. The highest contents of Ni, Cu, Pd and Pt contents (Fig 16) are associated with the Upper Mafic Zone rocks, and in less significant on the ultramafic zone. These highest contents of these metals have a positive correlation with modal sulfides.

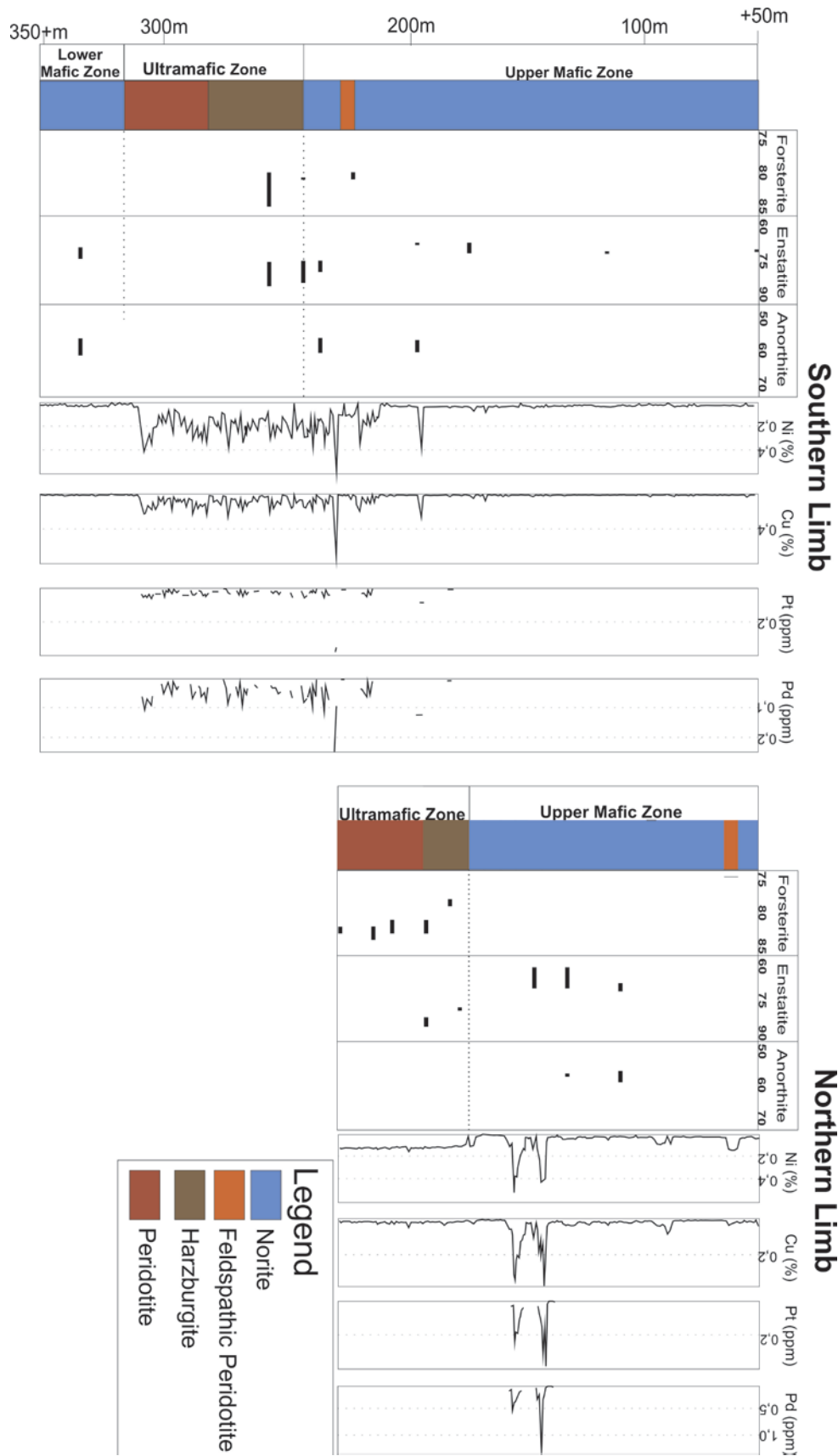


Figure 16 Compositional variations of cumulus minerals and Ni-Cu-Pg-Pt contents throughout the stratigraphy of the Mangabal Complex. Exploration assay data from Votorantin Metais is shown.

The sulfides occur in disseminated, net-textured and massive textures. Disseminated sulfides are mainly present in preserved igneous rocks and in metamorphic rocks where the igneous texture is completely preserved. Massive texture and net-textured are only present in metamorphic rocks, where the sulfides are remobilized.

The magmatic sulfides occur as disseminated aggregates that are interstitial to cumulus silicate. Norite holds the major part of disseminated sulfide heterogeneously, more concentrated in the basal portion of the Upper Mafic Zone. Harzburgite and dunite can hold a more continuous mineralization, but in lower tenor along the stratigraphy.

The principal ore minerals in Mangabal Complex of all rocks are pyrrhotite, pentlandite, pyrite and chalcopyrite. Native silver and nickel-tellurides (\pm PGE-bearing) are accessory minerals in metamorphic rocks. Pyrrhotite is the more abundant sulfide and occurs as fine to coarse crystals (depending on the total amount/texture of sulfide). Pentlandite is observed in two textures: polycrystalline veinlets occurring as irregular chainlike structures interstitial to pyrrhotite (and sometimes chalcopyrite) (Fig. 17-A); and “flame” textures in pyrrhotite resulting from the oriented exsolution of pentlandite from pyrrhotite. In coarse veinlets, pentlandite can re-equilibrate to a fine-grained intergrowth of pyrite and millerite (Fig. 17-B). Chalcopyrite is generally anhedral, occurring on the borders of the sulfide masses or as subhedral inclusions in pyrrhotite. When in massive texture, associated with metamorphic rocks, pyrite occurs in larger volume than in disseminated texture in the igneous rock, as an anhedral accessory sulfide. Pyrite is mainly anhedral but can appear in an idiomorphic cubic habit (Fig. 17-B) in metamorphic rocks.

Ni-Bi-Tellurides (+Pd bearing) are accessory minerals that usually occur in fractures of sulfides (Fig.18) and/or at the border between silicates and sulfide. The Pt+Pd contents on the rocks can reach 1,7 ppm.

Amphibolite and a more calcium-silicate-affinity rocks, from shear zones, in the complex are the more abundant metamorphic rocks and hold a remobilization of the sulfides that shows on these rocks massive and net-textured textures. (Fig. 17-C). On fig. 17-C it is possible to observe a garnet-bearing rock with massive sulfide and net-textured sulfide. When the metamorphism affect the rock, major agglomerates of sulfides between silicates is observed than those of directly igneous rocks (Fig 19).

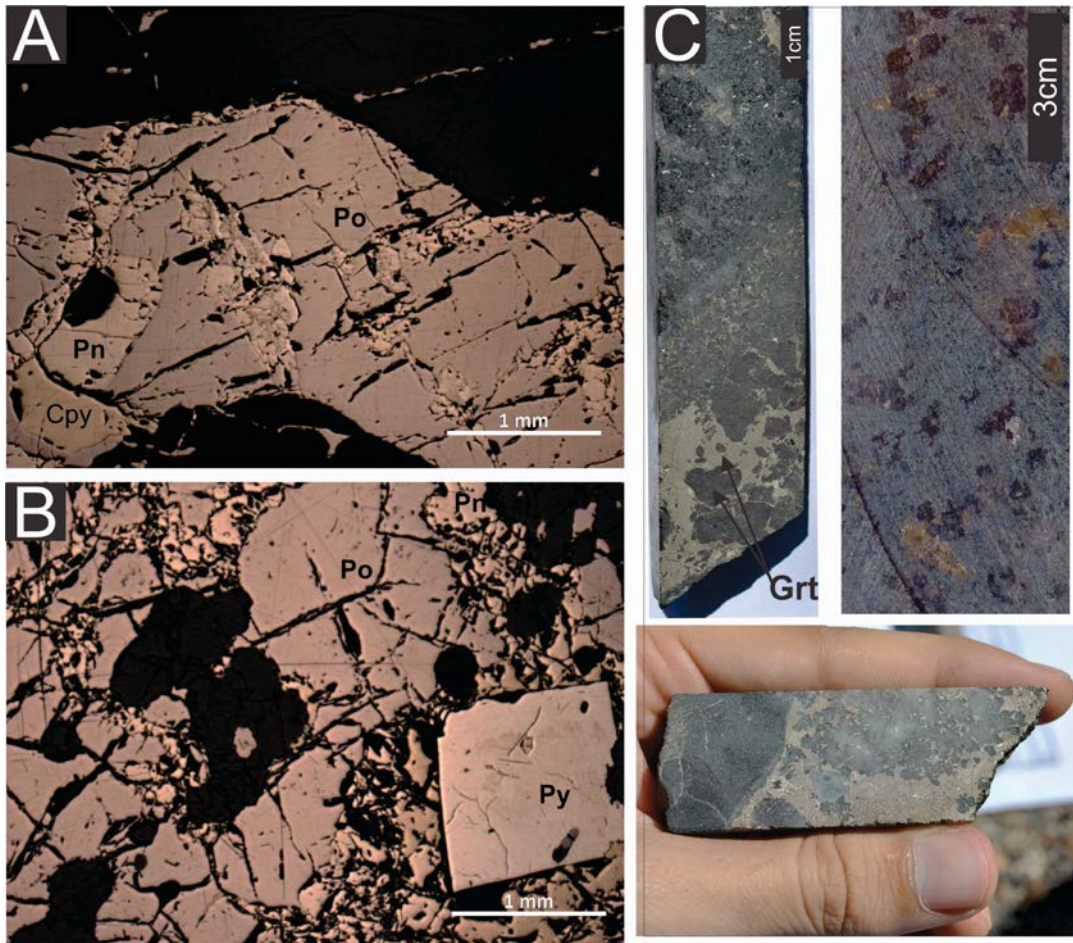


Figura 17 Photomicrographs of sulfides. (A) Pyrrhotite and polycrystalline veinlets of pentlandite. (B) Pyrrhotite and pentlandite with exsolution of pyrite. (C) Some examples of sulphides on drill core rocks.

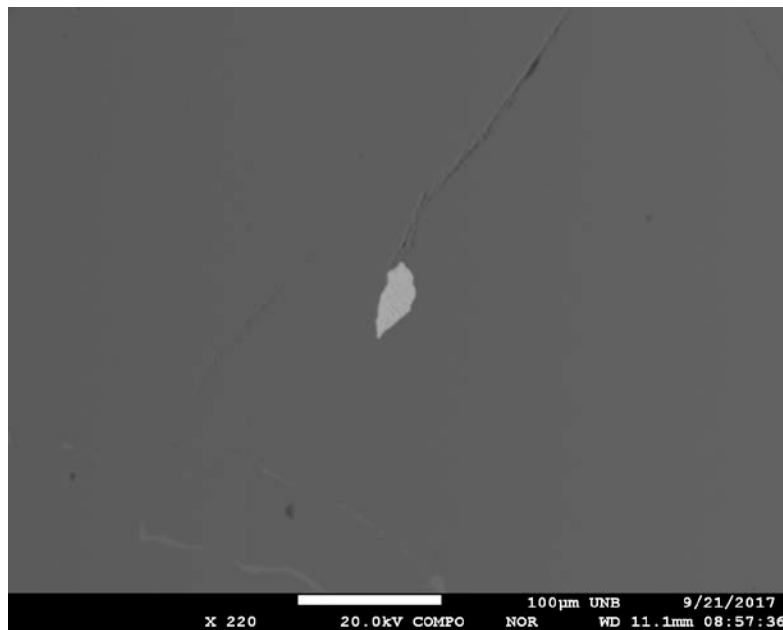


Figura 18 Pd-Ni-Bi-Tellurite in pyrite on massif sulphide of amphibolite.

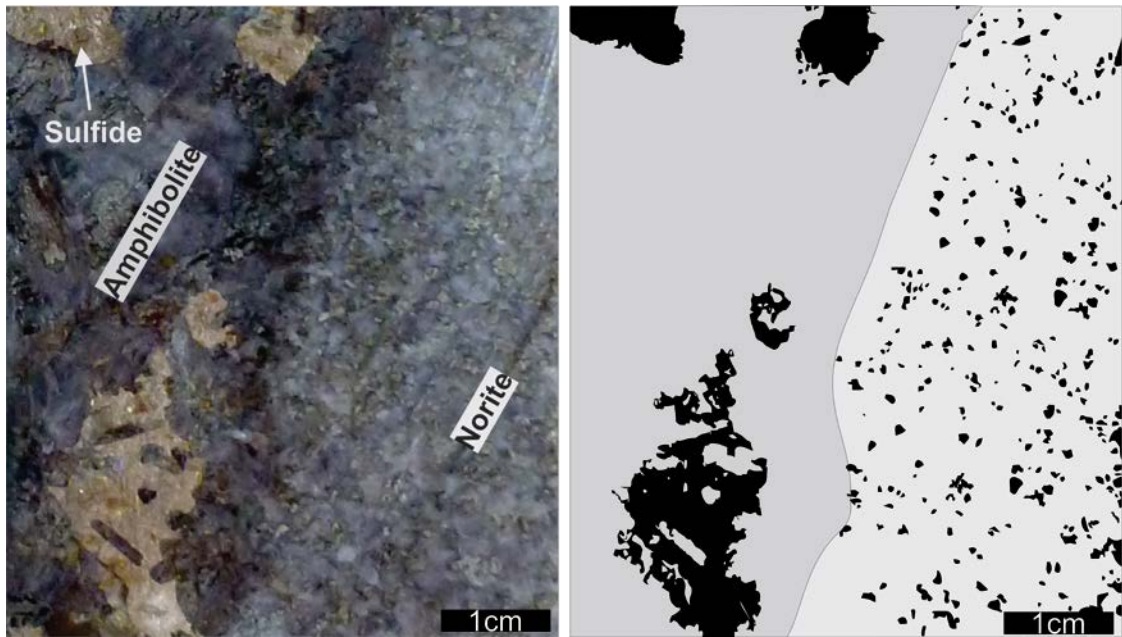


Figura 19 Photography and schematic draw of the picture showing the contact between amphibolite and norite and the difference of the spatial distribution of sulfides. The amphibolite show more coarse agglomerate of sulfides, while the norite show the small and more disseminated mass of sulfide.

5. Mineral Chemistry

Based on detailed sampling and petrographic studies, mineral compositions of different rocks were determined by 48 samples from drill-cores. Selected minerals for microprobe analyses comprise olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase, amphiboles, phyllosilicates, kyanite, epidote, garnet, oxides and sulfides. The complete dataset for mineral analyses is given in the Supplementary Table.

On the igneous rocks, systematic studies of the mineral chemistry of cumulus minerals from the Mangabal Complex (i.e., olivine, cr-spinel, orthopyroxene and plagioclase) were performed on samples collected in representative sections. Olivine was analyzed in samples of dunite, feldspathic dunite and harzburgite from the ultramafic zone. Orthopyroxene was analyzed in samples of harzburgite and norite from the Lower Mafic Zone, Ultramafic Zone and Upper Mafic Zone. Plagioclase was analyzed in samples of norite from Lower and Upper Mafic Zones. Oikocrysts of clinopyroxene from norites were also analysed. Compositional variation of olivine, orthopyroxene and plagioclase with stratigraphy in the Mangabal Complex is shown in figure 16 and representative analysis of the mineral chemistry of the igneous minerals can be seen in Table 3.

Table 3 Representative analysis of igneous minerals

Rock Type Mineral Sample Analysis	Peridotite			Harzburgite		Feldspathic Peridotite			Norite		
	Olv MNN01 2	Cpx MNN01 1	Plg MNN01 1	Olv MNS18 1	Opx MNS18 3	Olv MNS14 2	Cpx MNS14 2	Plg MNS14 1	Opx MNS11 19	Plg MNS11 6	Cpx MNS11 14
SiO ₂	38,93	50,07	51,72	39,36	53,90	39,30	50,36	53,04	53,27	52,88	54,25
TiO ₂	0,16	0,74	0,17	0,06	0,60	0,00	1,22	0,22	0,18	0,04	0,23
Al ₂ O ₃	0,00	4,12	29,01	0,01	3,11	0,02	4,95	28,58	1,85	30,26	3,51
Cr ₂ O ₃	0,02	1,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,78	0,06	0,13	0,13	0,43
FeO	16,22	5,20	0,43	16,12	10,54	16,57	4,35	0,00	18,30	0,00	6,73
MnO	0,31	0,19	0,10	0,27	0,20	0,17	0,09	0,04	0,49	0,03	0,15
MgO	43,28	16,53	0,25	43,49	29,21	43,34	15,10	0,02	25,51	0,02	15,95
CaO	0,02	20,10	11,51	0,02	1,20	0,01	22,24	12,27	0,20	12,33	18,11
Na ₂ O	0,04	0,44	4,96	0,02	0,26	0,00	0,54	4,81	0,00	4,10	0,44
K ₂ O	0,00	0,03	0,11	0,02	0,06	0,01	0,02	0,01	0,01	0,09	0,03
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
NiO	0,18	0,07	0,01	0,42	0,02	0,28	0,01	0,00	0,02	0,04	0,05
V ₂ O ₃	0,03	0,07	0,05	0,02	0,03	0,01	0,08	0,02	0,02	0,02	0,05
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	0,05	0,08
Total	99,19	98,54	98,32	99,80	99,38	99,73	99,75	99,07	99,99	99,97	100,00
Fo	82,62			82,87		82,34					
En		50,60			82,21		45,90		71,80		45,30
An			55,84					58,51		62,28	

Note: na - not analysed.

olv - olivine; opx - orthopyroxene; plg - plagioclase; Fo - forsterite; En - enstatite; An - Anorthite

Mineral chemistry of metamorphic rocks along all stratigraphy covering the Lower Mafic Zone, Ultramafic Zone and Upper Mafic Zone was analyzed. Amphibole, plagioclase and phyllosilicate were also analyzed because they represent the main constituents of the metamorphic rocks. Minor kyanite, garnet and epidote were also analyzed, when present.

Olivine

Forsterite content [$Fo=100 \times Mg/(Mg+Fe^{2+})$ atomic] of olivine ranges between 78 to 85, indicating moderately primitive compositions. The variation of forsterite contents shows upward decrease. Ni contents in olivine range from 1150 to 4570 ppm and are positively correlated with Fo content. In contrast, the MnO content is relatively variable and does not always correlate with the Fo content.

Orthopyroxene

Orthopyroxene compositions range from En 65 to En 85 mol% in the Ultramafic Zone. In the Mafic Zones (Lower and Upper) the compositions range from En61 to En 73. The Enstatite value of the Ultramafic zone is higher than the Mafic Zones and the pyroxenes are classified as enstatite. In the Mafic Zones (Upper and lower) the orthopyroxene is Bronzite. The variation of orthopyroxene in the ultramafic zone shows a consistent upward decrease in En contents, suggesting a normal fractionation trend. The variation within the mafic zone does not reveal the main trend of increase or decrease.

Plagioclase

Plagioclase is abundant in the Lower and Upper Mafic zones. The anorthite contents of plagioclase [$An=100 \times Ca/(Na+K+Ca)$, atomic ratio] for the cumulus minerals range from An50 to An66. It was not possible to correlate the cryptic variation of anorthite content on a principal trend. The principal value obtained shows a constant content of anorthite. The anorthite contents of the intercumulate plagioclase of the Ultramafic Zone range from 56 to 61, on the labradorite field. Metamorphic plagioclase can occur in a larger range of anorthite content ranging from 28 to 67, despite one sample in the oligoclase range, andesine and labradorite are more common.

Clinopyroxene

Clinopyroxene occurs as an intercumulate phase in the Ultramafic zone and as oikocrysts in the Upper Mafic Zone. It is an accessory mineral in all those rocks. The composition of clinopyroxene is close to the classification limit between Diopside and Augite, occurring both in some samples. Diopside composition is the most common.

Amphibole

Cationic compositions of amphiboles were recalculated on the 23 (O) basis, with Fe²⁺/Fe³⁺ estimation assuming $\Sigma 13$ cations - except for Fe-Mg-Mn amphiboles where $\Sigma 15$ is applied. The amphiboles of the Mangabal Complex can be divided into three groups.

The first group comprises the amphiboles that are part of the corona texture formed between olivine and plagioclase in igneous rocks. They are mainly of pargasitic composition and are formed on a pos-magmatic process.

The second group is the metamorphic Ca-amphiboles. These Ca-amphiboles are members of the subgroup defined by $Na+K \geq 0.50$ a.p.f.u (atoms per formula unit of the standard formula of amphibole) and $Ti > 0.50$ a.p.f.u; others belong to the subgroup characterized by $Na+K > 0.50$ a.p.f.u. The amphiboles range from tschermakite to actinolite (Fig. 21), but magnesium-hornblende is dominant. The Ca-amphiboles of the Ultramafic Zone is also more magnesian than the Ca-amphiboles of the Upper and Lower Mafic Zones. These amphiboles are essentially metamorphic minerals.

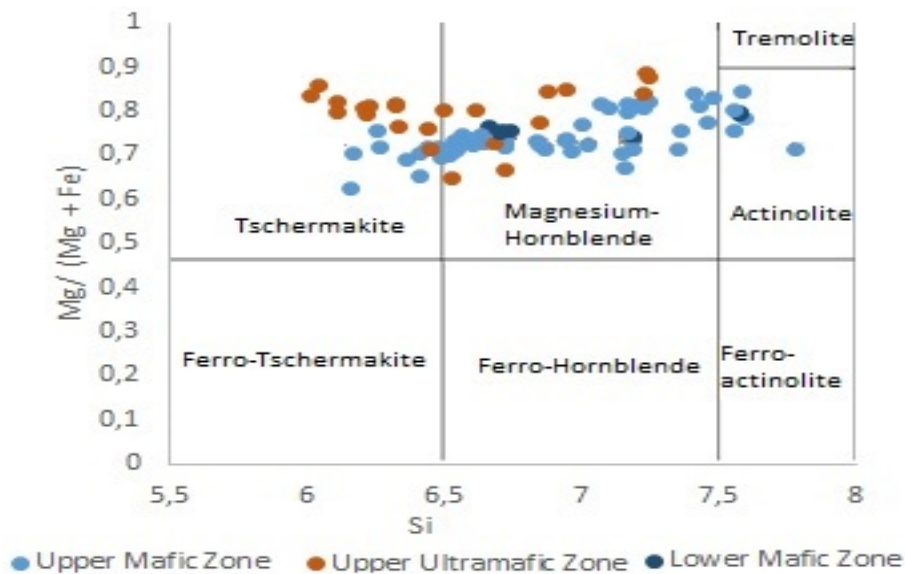


Figura 20 Composition of metamorphic hornblende.

The third group belongs to the Mg–Fe–Mn–Li amphiboles group, as defined by Leake et al. (1997) and are formed by metamorphic conditions. These Mg–Fe–Mn–Li amphiboles are gedrite and anthophyllite. Gedrite is present in the metanorite as alteration on the corona of bronzite. Anthophyllite occurs mainly in the metamorphic rocks of the Ultramafic Zone.

Anthophyllite is less aluminous and is observed in the complex metamorphic equivalents. The second orthoamphibole group, represented by gedrite compositions.

Spinel

Cumulus brown spinel was found and analyzed in samples of the Ultramafic Zone. The dominant end member of the oxide is spinel, but with chromite value high, being the classification is of Cr-Spinel. Only in one sample, the chromite end member prevailed, but very close to the spinel composition. All spinels are Al-rich, with Cr number $[Cr\# = 100 \times Cr / (Cr + Al)]$,

atomic ratio] ranging from 26 to 30 and Fe³⁺ number [$Fe^{3+}\# = 100 \times Fe^{3+} / (Cr + Al + Fe^{3+})$, atomic ratio] ranging from 1 to 14.

6. Sm-Nd Isotopes

The Sm-Nd isotopic data from Mangabal Complex are listed in Table 4. Epsilon recalculation of these data was done to the time of the K-Ar age of Mangabal (612 Ma) and U-Pb age for crystallization of Americano do Brasil Complex (626 Ma), those ages were calculated by Gioia (1997) and Laux *et al.* (2004), respectively. Evolution diagram of ϵNd vs time is shown in Figure 22.

Table 4 Sm-Nd isotopic data for the Mangabal Complex

Sample	Lithotype	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$\pm 2SE$	$\epsilon Nd(0)$	$T_{DM}(Ga)$	$\epsilon Nd(612)^1$	$\epsilon Nd(626)^2$	$\epsilon Nd(Tdm)$
MNN01 ³	Dunite	0.987	3.964	0.1504	0.512574	6	-1.25	1.15	2.38	2.46	5.38
MNN04 ³	Harzburgite	1.295	4.775	0.1646	0.512662	10	0.47	1.20	2.98	3.04	5.26
MNN07 ³	Harzburgite	1.118	4.275	0.1582	0.512636	6	-0.04	1.14	2.98	3.05	5.4
MNS20 ⁴	Metadunite	0.55	2.227	0.1492	0.512579	3	-1.15	1.12	2.56	2.65	5.45
MNS25 ⁴	Amphibolite	0.642	2.427	0.1599	0.512571	6	-1.31	1.33	1.57	1.64	4.95
MNS27 ⁴	Norite	1.185	4.856	0.1475	0.512462	6	1.31	1.33	0.42	0.5	4.95

¹ K-Ar Age of Mangabal (Gioia, 1997)

³ Samples of Northern Limb.

² U-Pb Age of Americano do Brasil Complex (Laux *et al.* 2004)

⁴ Samples of Southern Limb.

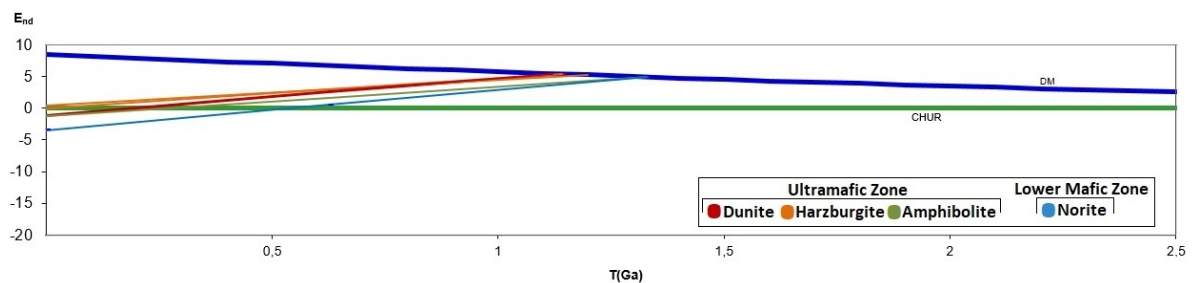


Figura 21 Evolution diagram of ϵNd vs time for Mangabal Complex's samples.

7. Geothermobarometry

The application of geothermometers and geobarometers in metamorphic minerals of the Mangabal Complex aims at establishing temperatures and pressure of the peak of metamorphic conditions that affected the complex.

The plagioclase-amphibole pair of Holland and Blundy (1994) was calibrated for amphibole ($N_{Aa} > 0.02$ pfu, $Al_{(IV)} < 1.8$ pfu, and Si between 6.0 and 7.7 pfu) and plagioclase ($X_{an} < 0.90$), considering edenite-richterite reaction: edenite + albite = richterite + anorthite. This thermometry was combined with the Al-in-hornblende barometry described by Anderson and Smith (1995). The

results are shown in table 5. The values of pressure are between 5.7 and 8.59 kbar, and the temperature between 681 to 748°C.

Table 5 Thermobarometry of Mangabal Complex amphibolite calculated by Holland and Blundy (1994) and Anderson and Smith (1995)

Amphibole Data								
Sample	MNS08	MNS08	MNS10	MNS17	MNS17	MNS23	MNS25	MNS25
N°	1	2	5	2	3	1	2	3
SiO ₂	46,81	46,19	47,58	44,48	45,22	44,76	47,40	47,59
TiO ₂	0,38	0,39	0,27	0,16	0,38	0,29	0,37	0,30
Al ₂ O ₃	13,26	14,03	11,84	16,42	15,72	12,68	12,25	11,91
FeO*	9,23	9,08	10,08	7,66	7,62	10,21	8,62	8,97
MgO	14,58	14,09	15,23	13,96	13,86	14,36	14,99	15,30
MnO	0,26	0,25	0,22	0,13	0,17	0,25	0,13	0,10
CaO	10,52	10,64	10,77	11,09	11,42	11,51	10,74	10,93
Na ₂ O	1,90	2,02	1,57	1,82	1,90	1,95	1,77	1,73
K ₂ O	0,20	0,25	0,21	0,24	0,24	0,28	0,19	0,18
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,01	0,06	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
Sum	97,14	96,10	97,77	95,97	96,55	96,31	96,47	97,03

Plagioclase Data								
N°	5	6	1	1	2	2	1	2
XAb	43,84	55,43	55,96	32,44	37,93	47,05	54,52	41,51
XAn	55,90	44,19	43,80	67,42	61,85	52,66	45,14	58,24

Results using Holland and Blundy (1994) for temperatura and Anderson and Smith (1995) for pressure.								
T (C) HB2	718,67	687,42	681,57	747,76	727,93	748,64	674,01	722,48
P(Kb) HB2	6,83	8,00	6,30	8,59	8,52	5,96	6,79	5,74

8. Discussion

Magmatic Structure of the Layered Complex

The Mangabal Complex is one of a number of layered mafic-ultramafic intrusions located in the southern part of the Goiás Magmatic Arc. Several bodies were identified in geochemical and/or geophysical exploration surveys, but detailed mapping and petrological studies are so far limited to a few intrusions, including Americano do Brasil Complex (Nilson, 1981; Nilson et al 1986; Mota e Silva, 2009), Damolândia (Della Giustina, 2010; Maia, 2016), Taquaral (Della Giustina, 2010) and Santa Bárbara (Silva, 1991).

Despite the superposed amphibolite-facies metamorphism, primary minerals and textures are still partially preserved and reveal that the layered rocks originated mainly from crystallization of cumulus olivine, Cr-spinel, orthopyroxene and plagioclase, suggesting a

crystallization sequence consisting of $Ol+Cr-spl > Ol+Opx > Opx + Plg > Cpx$. The orthopyroxene precedes clinopyroxene, this early crystallization indicates that the primary magma was silica saturated (Campbell, 1985).

The Lower Mafic Zone is dominated by norite and it is interpreted as representative of border zone of the magma chamber because the location on the stratigraphy and it is supported by the different pattern of the Sm-Nd isotopes of these rocks. The ϵNd values are much lower and T_{dm} values are higher if in comparison to the other samples of the complex, maybe caused by a contribution of contamination by the gneissic host rocks. The contact between the Lower Mafic Zone and Ultramafic Zone is marked by the change from a monotonous to a highly variable sequence of rock types. The olivine compositional range (Fo 78 to 85) indicates moderately primitive compositions and presents an upward decrease, the expected of the evolution of a pulse in the magma chamber. The OPX enstatite content of the Ultramafic Zone is higher than the ones calculated for the Mafic Zone, consistent with the progressively more evolved compositions. The Ultramafic Zone and the Upper Mafic Zone do not show a significant trend of the composition. The evolution of the plagioclase composition was not possible to establish with the analyses.

Metamorphism

The medium- to coarse-grained metamorphic minerals of the Mangabal Complex are indicative of amphibolite facies. The Mangabal Complex amphibolites show the following metamorphic parageneses: $Hbl + Plg + Bt$; $Hbl + Oam + Plg + Bt$, $Hbl + Plg + Bt + Ky$, $Hbl + Oam + Plg + Ky$. In all these assemblages, it is possible to identify apatite, titanite and rutile as accessory minerals. Carbonate, muscovite and chlorite can occur as later alteration, possible at retrograde metamorphism conditions. The differences between the presences of certain minerals in the metamorphic assemblage are due to the small difference between the igneous protolith. It is the first description of kyanite in a metamorphosed mafic-ultramafic layered intrusion in the Arenópolis Arc.

Bucher and Grapes (2011) use ACF diagrams to represent metamorphic mineral assemblages in different conditions of metamorphism. Ky-bearing amphibolite is diagnostic of high-P amphibolite facies (typically greater than 700 MPa, ~7 kbar).

The paucity of kyanite(\pm staurolite)-bearing amphibolites, if compared with classic hornblende-plagioclase amphibolite, is due to a specific window of P-T-X leading to their formation. Arnold (1994) studied staurolite and kyanite amphibolites, calculating phase relations with application to amphibolites and determined that the stability field for kyanite-hornblende in the CFMASH system is restricted for intermediate to magnesian composition rocks. As the stability of this assemblage forms at a specific P-T condition, it will be rarely preserved in convergent orogens due to the subsequent complex P-T history. As observed in Figure 25, the stability field of a kyanite-orthoamphibole-hornblende assemblage, as found in the Mangabal Complex, is very limited. Thus, it is possible to delimit this field as representative of the metamorphism conditions of the Mangabal Complex.

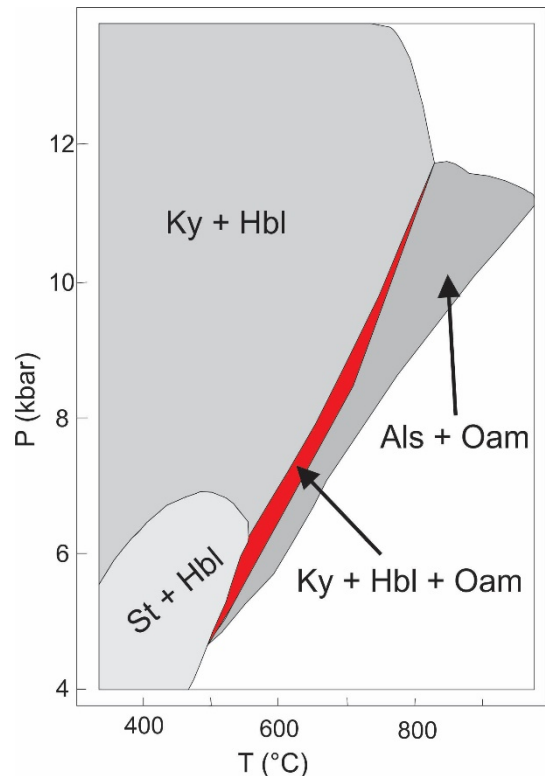


Figura 22 The stability fields of the assemblage *ky-hbl*, *st-hbl* and aluminosilicate + orthoamphibole (+ plg, quartz and aqueous vapors) on the CFMASH phase diagram. Modified from Arnold (1994). The red part is the one which represents Mangabal complex.

Furthermore, using the amphibole-plagioclase thermometry of Holland and Blundy (1994) combined with the Al-in-hornblende barometry described by Anderson and Smith (1995) the results (table 5) indicates a peak of metamorphism in pressure around 8.5 kbar and 747°C. The sample MNS17 is one of the samples in which kyanite-orthoamphibole-hornblende assemblage is observed. The geothermobarometric results calculated for this rock, when interpolated on the diagram phase of Arnold (1994), are correspondent to the value of *ky-oam-hbl* assemblage. It is possible to establish the maximum metamorphic conditions of P-T around ~8.5 Kbar and between 727 – 747°C.

Candia (1983) applied available theoretical data and estimated temperatures between 700 and 780°C and pressures above 6 kbar for the Mangabal Complex. The temperature estimates are very similar, but pressure values are higher than previously estimated, what can be explained due to the different mineralogy identified in this work. Candia (1983) did not describe kyanite, a key mineral for delimiting the pressure conditions of metamorphism.

Clinopyroxene oikocrists

The Mangabal Complex and the other nearby layered mafic-ultramafic intrusions are commonly associated with the same tectonic event and with the same magmatic origin (Gioia, 1997; Laux et al, 2004; Pimentel et al 2004; Mota e Silva 2009). The resemblance between Americano do Brasil complex and Mangabal is cited since the first reports of the complexes (e.g. Nilson, 1981; Votorantin, 2012).

The Americano do Brasil Complex was described by Nilson (1981), referred to large oikocryst of clinopyroxene enclosing olivine and orthopyroxene, partially or totally altered to amphibole (hornblende). Mota-e-Silva (2009) and Mota-e-Silva et al. (2011) described the significant amount of amphiboles (up to 60% vol) as igneous oikocrysts formed as crystallized from water-rich trapped liquids in the cumulus pile.

In the Mangabal Complex, dunite and norite show oikocryst textures very similar to those found in the Americano do Brasil rocks. These oikocrysts preserve several stages of alteration, ranging from totally preserved clinopyroxene (augite) to pseudomorphically, completely replaced amphibole (magnesium-hornblende). These stages of evolution can be seen in Fig. 26. On fig.26-A it is possible to see preserved oikocryst of clinopyroxene (augite) enclosing orthopyroxene (bronzite). On Fig. 26-B, a photomicrograph of the same sample as Fig. 26-A is an example of altered boundaries of clinopyroxene oikocryst, the core is of preserved clinopyroxene (augite) and on the boundaries of the oikocryst, it is possible to see an alteration to green hornblende. Between the complete hornblende and preserved clinopyroxene, it is possible to see, on the midway stage, many fine inclusions of spinel. Fig-26 C shows an amphibolite with reliquary texture of the clinopyroxene oikocryst with a lot of spinel inclusion, as we can see in fig 26-B. Fig. 26-D is a metanorite, where we can see cumulate orthopyroxene, and hornblende as pseudomorphs of clinopyroxene oikocryst, with small preserved cores.

The most common feature is a shell of magnesium-hornblende and cores of clinopyroxene, both in optical continuity. This feature is similar to those described by Suvanto (2014), Kelemen and Ghiorso (1986) and Jesus et al (2014) in mafic-ultramafic rocks. All those works described as a metamorphic amphibole replacing pyroxene and/or clinopyroxene oikocrysts. On Mangabal Complex mineral chemistry helped to identify the cores of clinopyroxene and borders of amphibole that together with the texture features

indicate that hornblende formation as result of amphibolite facies metamorphism that reached the Complex. These megacrysts of poikilitic hornblende were described on Americano do Brasil by Nilson (1981) in the association of others amphibolite facies minerals as tremolite-actinolite, anthophyllite or cummingtonite and formed in subsolidus, in a possible metamorphic condition. The amphibole oikocrysts of both complexes, Mangabal and Americano do Brasil, have similar textures and are interpreted as metamorphic mineral formed by amphibolite facies metamorphic alteration of igneous pyroxene. It indicates that the metamorphic conditions that affected both complexes are similar.

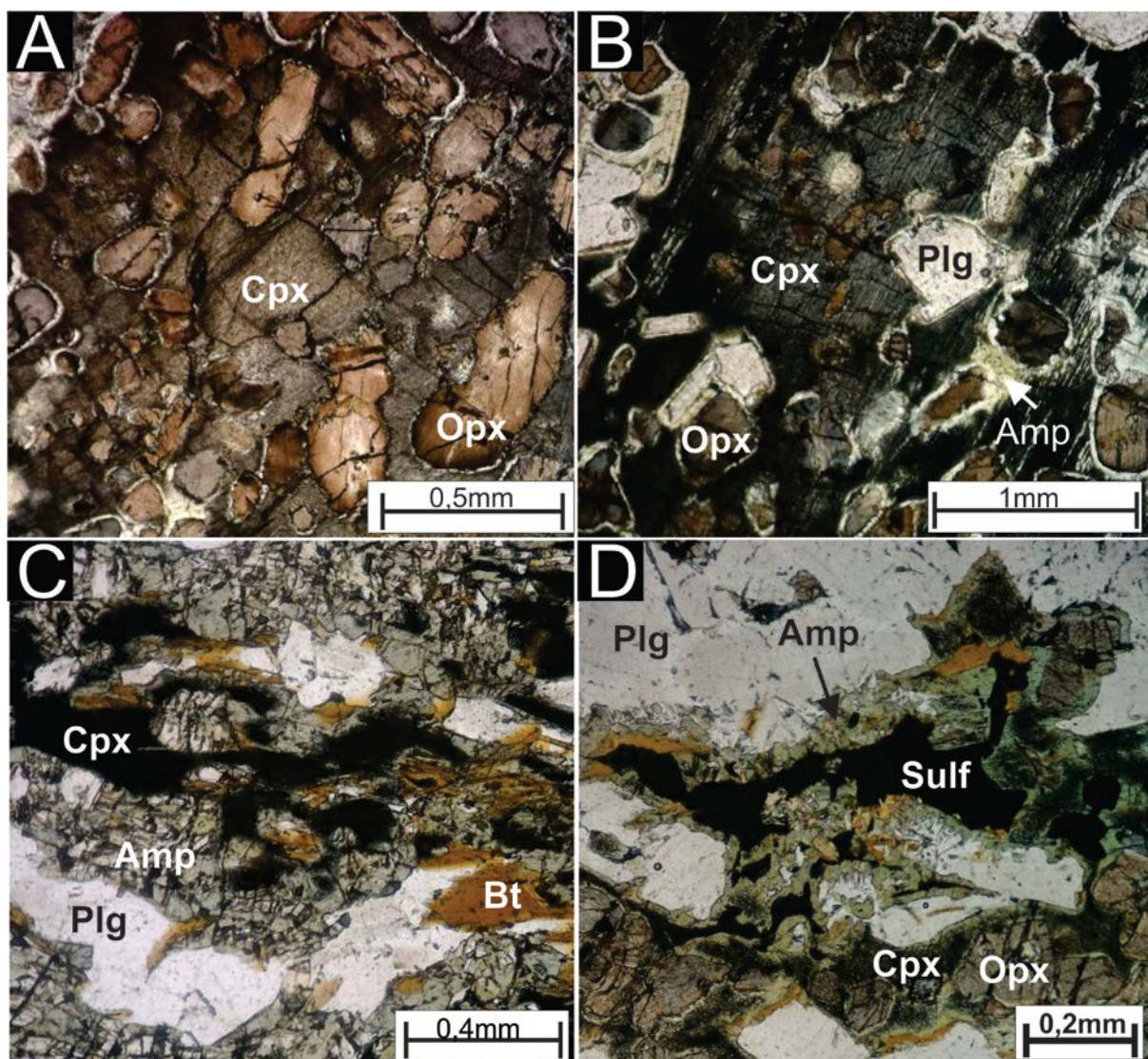


Figura 23 Photomicrographs of clinopyroxene in poikilitic texture in norite. A to D shows a sequence of texture evolution of the amphibole replacing pyroxene.

Ni-Cu± PGE Mineralization

Major Ni-Cu-PGE mineralization is located in the ultramafic zone and in the basal portion of the upper mafic zone. The rocks have textures which exhibit intercumulus disseminated sulfides on igneous and metamorphic rocks and layers of pegmatoidal, “poikilitic” massive sulfide grading to net-textured on shear-zones in rocks of metamorphic conditions.

The Ni-Cu-PGE mineralization is restricted to some portions of the magma chamber and reveals magmatic textures typical of sulfide liquid segregation from a mafic-ultramafic magma that filled the spaces between the already crystallized cumulus phases. Magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits are formed of the segregation and accumulation of immiscible sulfide liquid from mafic or ultramafic magmas (Naldrett, 1997). The more abundant disseminated mineralization on the Mangabal Complex is located at Upper Mafic Zone, in adcumulate rocks. Barnes et al (2016) affirm that mineralization is commonly associated with the highest degree partial melts, the least fractionated magmas, and with the most adcumulate rocks (i.e., those containing the highest proportion of cumulus minerals to intercumulus trapped liquid) in conduit systems. They also pointed that in mafic-parented systems the clearest proxy for fertile magmatic environments is the presence of olivine + Cr-spinel cumulates (Barnes et al 2016).

Both characteristics are notable on the Mangabal Complex, disseminated ore on adcumulate rock dispersed for more than 100 m and presence of olivine and cr-spinel cumulates, indicating a fertile magmatic environment. For the Mangabal Complex, the existence of a magma conduit near the prospects has not been proven but it the environment is a potential for conduit system.

9. Conclusions

Geological and petrological characterization of the Mangabal Complex provides new information about the complex and the geological context about it. The principal conclusions of this study are as follow:

1. The complex is divided into the northern limb and southern limb, and their rock sequences probably represent the same magma chamber.

2. The Complex has a normal crystallization sequence. Is not a inverted magma chamber as described previously.
3. Petrological data suggest that the crystallization sequence of Mangabal Complex is Olivine + Cr-Spinel > Olivine + Orthopyroxene > Orthopyroxene + Plagioclase > Clinopyroxene. The forsterite content of the cumulus olivine (Fo 78-85) suggests a moderate primitive parental magma.
4. The regional metamorphism that affected the Mangabal Complex reached high-pressure amphibolite facies, in temperature conditions between 727°C and 747°C and pressures around ~8.5 kbar.
5. It is the first record of kyanite-orthoamphibole-bearing amphibolite in the mafic-ultramafic layered intrusions of the Arenópolis arc.
6. The igneous environment is fertile for disseminated sulfide mineralization and the deformation and metamorphism that affected the Complex concentrate the mineralization.
7. The platinum group-elements, mainly Palladium (Pd), are concentrate on shear zones cross-cutting the complex.

Acknowledgements

This study was supported by CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) and FAP-DF (Fundação de Apoio a Pesquisa do Distrito Federal). Analytical facilities of the Instituto de Geociências of the University of Brasília (UnB) provided additional support for this research. The authors acknowledge Votorantin Metais S.A. for access to exploration data and drill cores, which was essential for this work. C. T. A. thanks CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) for the MSc Scholarship. This study is part of the first author MSc dissertation developed at the Instituto de Geociências (Universidade de Brasília).

CAPÍTULO 3

1. Discussão

Estrutura Magmática do Complexo Acamadado

O Complexo de Mangabal faz parte das diversas intrusões máfico-ultramáficas localizadas na parte sul do Arco Magmático de Goiás. Diversos complexos foram identificados em levantamentos de prospecção geoquímica e/ou geofísicos, mas mapeamento detalhado e estudos petrológicos são até o momento limitados a apenas algumas intrusões, como Complexo Americano do Brasil (Nilson, 1981; Nilson et al 1986; Mota e Silva, 2009), Damolândia (Della Giustina, 2010; Maia, 2016), Taquaral (Della Giustina, 2010) e Santa Bárbara (Silva, 1991).

Apesar do metamorfismo em fácies anfibolito que atingiu o complexo, texturas e mineralogias primárias são preservados em algumas zonas. Os resultados obtidos em rochas coletadas nessas porções indicam que originaram-se principalmente da cristalização de minerais cúmulus de olivina, Cr-espinélio, ortopiroxênio e plagioclásio, sugerindo uma sequência de cristalização consistindo em $Ol + Cr-spl > Ol + Opx > Opx + Plg > Cpx$. A cristalização precoce do ortopiroxênio indica que o magma primário era saturado em sílica (Campbell, 1985).

A Zona Máfica Inferior é dominada por norito e é considerada a borda da câmara magmática, esta interpretação é feita pela posição estratigráfica, na porção basal é suportada pelo TDM, que nestas rochas apresenta uma idade mais antiga, indicando possível contaminação da rocha hospedeira mais antiga e pelo ϵNd mais próximo de zero. O contato entre a Zona Máfica Inferior e a Zona Ultramáfica é marcada pela mudança de uma sequência monótona de norito para uma ampla sequência de rochas distintas. O intervalo de composição de olivina (Fo 78 a 85) indica composições moderadamente primitivas e apresenta um decréscimo do teor ao topo, sendo isto esperado durante a evolução de cristalização da câmara magmática. O conteúdo de enstatita do ortopiroxênio da Zona Ultramáfica é superior aos calculados para Zona Máfica, o que é consistente com as composições progressivamente mais evoluídas. A Zona Ultramáfica e a Zona Máfica Superior não apresentam tendência significativa de variação da composição. A evolução do valor de anortita do plagioclásio não foi possível estabelecer com as análises.

Metamorfismo

Os minerais metamórficos, de tamanho médio a grosso, do Complexo de Mangabal são indicativos de fácies anfibolito. Anfibolitos ocorrem ao longo de todo o complexo com principais assembleias metamórficas constituídas de: Hbl + Plg + Bt; Hbl + Oam + Plg + Bt, Hbl + Plg + Bt + Ky, Hbl + Oam + Plg + Ky. Em todas as assembleias principais descritas acima é possível encontrar apatita, titanita e rutilo como minerais acessórios. Carbonato, muscovita e clorita podem ocorrer como alterações posteriores, provavelmente por condições retrometamórficas. A diferença entre as assembleias minerais se deve a pequenas diferenças químicas do protolito ígneo. A presença de cianita em rochas das intrusões máfico-ultramáficas do Arco de Arenópolis é descrita pela primeira vez neste trabalho.

Bucher e Grapes (2011) utilizam diagramas ACF para representar assembleias metamórficas de rochas de composição basáltica, em diversas condições de metamorfismo. Nestes diagramas os anfibolitos que possuem cianita na paragênese são diagnósticos de fácies anfibolito de alta pressão (tipicamente superiores a 700 MPa, ~ 7 kbar).

A escassez de anfibolitos máficos com cianita (\pm estaurolita), se comparado com os anfibolitos “clássicos” é devido a uma janela muito específica de condições P-T-X para a formação. Arnold (1994) estudou estaurolita-cianita anfibolitos, calculando relações de fase com aplicação em anfibolitos e assim delimitando campos de estabilidade de cianita e hornblenda em sistemas CFMASH em rochas de composição intermediária a magnésiana. Com este estudo notou-se que o campo de estabilidade de cianita e anfibólios nestas rochas é muito restrito.

Como a estabilidade desta assembleia metamórfica ocorra apenas em condições de P-T muito específicas, raramente é preservada em orógenos devido ao seu histórico P-T. Pode se

pode observar na Figura 22 o campo de estabilidade para o conjunto de cianita-ortoanfibólio-hornblenda, assembleia esta que é encontrada no Complexo de Mangabal. O campo de estabilidade é muito limitado e, com isso, é possível delimitar as máximas condições de P-T que atingiram estas rochas.

Além disso, usando a termometria anfibólio-plagioclásio de Holland e Blundy (1994), com reação de calibração edenita + albita = richterita + anortita e combinada com a barometria de alumínio em hornblenda, descrita por Anderson e Smith (1995), as condições P-T dos anfibolitos do complexo de Mangabal estão expostas na Tabela 3.

A amostra MNS17 é uma das amostras em que a assembleia metamórfica cianita, ortoanfibólio e hornblenda ocorre em equilíbrio. Os resultados da condição P-T nessa rocha, quando interpolados no diagrama de fase de Arnold (1994) correspondem aos valores P-T da mesma assembleia encontrada por Arnold (1994). É possível então delimitar as condições metamórficas máximas de P-T que atingiram o Complexo em torno de ~ 8,5 Kbar e entre 727° a 747 ° C.

Candia (1983) usou dados teóricos disponíveis na década de 80 para estimar condições de P-T, chegando a temperaturas entre 700 e 780 ° C e pressões acima de 6 kbar. A estimativa de temperatura encontrada neste trabalho é muito próxima da encontrada por Candia (1983), porém a pressão é maior que a anteriormente estimada. Esta diferença de pressão encontrada pode ser explicada pela mineralogia diferente encontrada. Candia (1983) não descreveu a cianita em anfibolitos, mineral chave para delimitar maiores condições de pressão do metamorfismo.

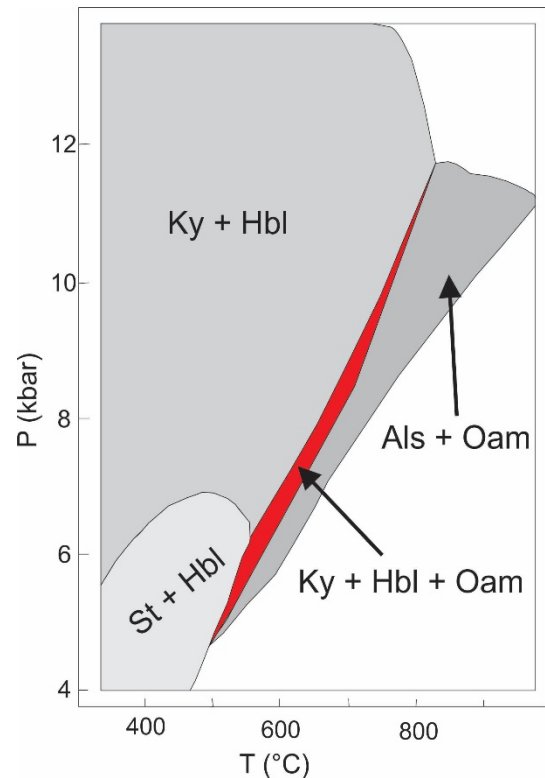


Figura 24 Campos de estabilidade das paragéneses *ky-hbl*, *st-hbl*, hornblenda + aluminossilicato + ortoanfibólio (+ *plg*, *qtz* e *H2O*) no diagrama de fases CFMASH. Modificado de Arnold (1994). A porção em vermelha é a que representa as condições encontradas em Mangabal.

Oikocristais de Clinopiroxênio

O Complexo de Mangabal e outras intrusões acamadadas máficas-ultramáficas do arco de Arenópolis são comumente associados ao mesmo evento tectônico e com a mesma origem magmática (Gioia, 1997; Laux et al, 2004; Pimentel et al 2004; Mota e Silva, 2009). A semelhança entre o Complexo Americano do Brasil e o Complexo Mangabal é citada desde os primeiros estudos e relatórios sobre os complexos (ex. Nilson, 1981; Votorantim Metais, 2012). O complexo de americano do brasil, descrito por Nilson (1981), apresenta oikocristais de clinopiroxênio envolvendo olivinas e ortopiroxênio, parcialmente ou completamente alterados para anfibólio (hornblenda). Mota-e-Silva et al (2011) descrevem uma quantidade significativa de anfibólitos (até 60% vol) como oikocristais ígneos cristalizados a partir de líquidos ricos em água presos entre os cúmulos.

No Complexo Mangabal, em dunito e norito, apresentam oikocristais com texturas muito semelhantes àquelas encontradas nas rochas de Americano do Brasil. Esses oikocristais apresentam vários estágios de alteração, que vão desde clinopiroxênio (augita) totalmente preservado até completamente substituído (magnésio-hornblenda, geralmente). Estes estágios de evolução podem ser vistos na figura 28. Na Figura 28-A é possível ver um oikocristal de clinopiroxênio (augita) completamente preservado envolvendo ortopiroxênio (bronzita). Na Figura 28-B, uma imagem da mesma amostra de 28-A, é um exemplo de cristal de clinopiroxênio com bordas alteradas para anfibólio, o núcleo apresenta preservado (augita) e nos limites do oikocristal é possível ver uma alteração para hornblenda verde. Entre o estágio de clinopiroxênio preservado e totalmente anfibólio, o oikocristal apresenta diversas inclusões de espinélio. A figura 28-C mostra um anfibólito com textura reliquiar de oikocristal de clinopiroxênio com diversas inclusões de espinélio, semelhante a vista da fig 28-B. A figura 28-D é um exemplo de meta-norito onde se pode observar cumulos de ortopiroxênio e oikocristais de hornblenda, como pseudomorfos de clinopiroxênio, apresentando pequenos núcleos preservados de clinopiroxênio. A característica mais comum destes oikocristais são bordas de hornblenda e núcleos preservados de clinopiroxênio, ambos com continuidade óptica. Estas texturas são similares às descritas por Suvanto (2014), Kelemen and Ghiorso (1986) and Jesus et al (2014) em rochas máfico-ultramáficas. Todas descritas como alterações onde anfibólio substitui oikocristais de piroxênios.

No Complexo Mangabal análises de química mineral auxiliaram a identificar núcleos de piroxênio e bordas de anfibólio, que junto com aspectos texturais apresentam a formação do

anfibólio como resultado de um metamorfismo em fácies anfibolito que atingiu o complexo. Esses megacristais de hornblenda poiquilítica foram descritas em Americano do Brasil por Nilson (1981) em associação de outros minerais de facies anfibolito, como tremolita-actinolita, antofilita ou cummingtonita, formados em subsolidus, em uma possível condição metamórfica. Os oikocristais de anfibólio de ambos os complexos, Mangabal e Americano do Brasil, têm texturas semelhantes e são interpretados como mineral metamórfico formado por condições metamórficas de fácies anfibolito a partir de piroxênio ígneo. Isso pode indicar que as condições metamórficas que afetaram ambos os complexos são semelhantes.

Além das evidências texturais da transformação de clinopiroxênio para anfibólio, características do anfibólio indicam sua procedência metamórfica. Em intrusões máfico-ultramáficas não é incomum encontrar anfibólios ígneos como últimos estágios de cristalização. Anfibólios ígneos nestas rochas ocorrem de maneira mais escassa, como restos do líquido e os registros de anfibólios ígneos nestas rochas são de coloração marrom (e.g. McCallum, 2002 em Stillwater Complex; Jesus et al, 2014 em Breja Gabbro; Azer et al, 2016 na Intrusão Shahira). A coloração marrom é devida à temperatura alta de cristalização, que permite o elemento titânio entrar em sua estrutura cristalina, ou seja, os anfibólios ígneos apresentam valores maiores de titânio (chegando a mais de 4%) do que anfibólios metamórficos (geralmente abaixo de 1%).

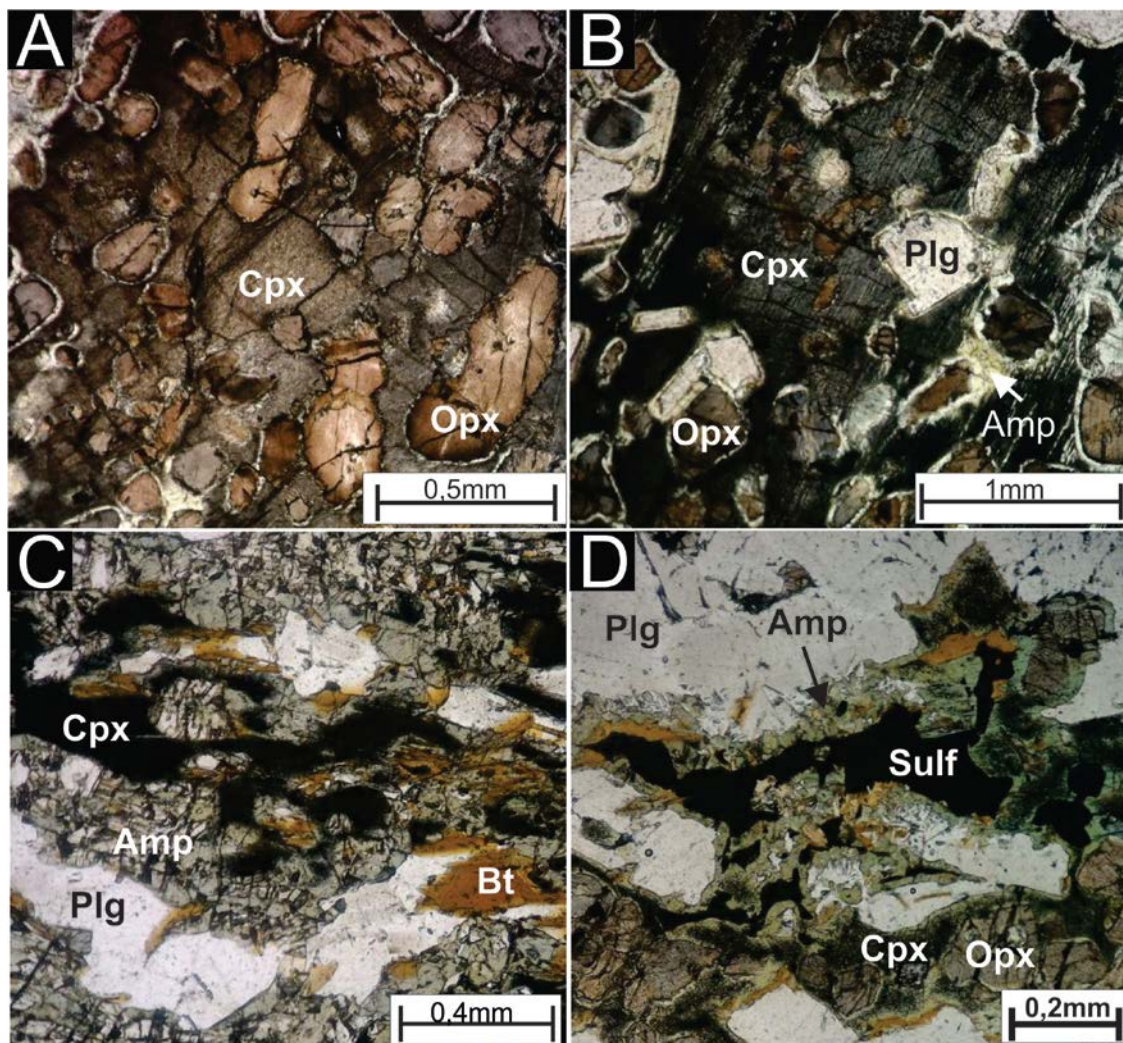


Figura 25 Fotomicrografias oikocristais de clinopiroxênio em norito. A) Oikocristal de clinopiroxênio e chadacrístais de ortopiroxênio. B) Oikocristal de clinopiroxênio parcialmente alterado para hornblenda, C) Anfíbolito com relicto textural de clinopiroxênio. D) Metanorito com ortopiroxênio cumulativo e oikocristal de clinopiroxênio parcialmente alterado para hornblenda e biotita.

Mineralização de Ni-Cu(±EGP)

A mineralização de Ni-Cu±EGP ocorre principalmente localizada na Zona Ultramáfica e na porção basal da Zona Máfica Superior. As rochas possuem texturas que exibem sulfetos disseminados, em textura “net-textured” entre fases cúmulos e porções de sulfeto maciço, que gradam para textura *ned-textured*. O minério disseminado consiste em sulfetos que ocorrem intersticiais aos silicatos ígneos, o minério de textura intersticial consiste em matriz de sulfetos entre cristais de silicato e sulfetos maciços que podem desenvolver a textura "poiquilítica"

O minério de Ni-Cu-EGP é restringido a algumas porções da câmara magmática e mostra texturas típicas da segregação líquida de sulfeto de um magma máfico-ultramáfico, que encheu os espaços entre as fases cumulus já cristalizadas. Os depósitos magmáticos de sulfeto de Ni-Cu-EGP são formados pela segregação e acumulação de líquido sulfetado imiscível a partir de magmas máficos ou ultramáficos (Naldrett, 1997). Barnes et al (2016) afirmam que a mineralização é comumente associada com fusão parcial, magmas menos fracionados e em rochas adcumuláticas (isto é, aquelas que contém a maior proporção de minerais cùmulos do que líquido) nos sistemas de condutos. Eles também apontam que, em sistemas máficos como Noril'sk-Talnakh, o agente mais claro para ambientes magmáticos férteis é a presença de acumulações de olivina + Cr-espinélio (Barnes et al, 2016). Para o Complexo de Mangabal, a existência de um duto magmático perto das intrusões não foi comprovada. A presença de sulfetos é dispersa por mais de 100 m e a constância relativa dos sulfetos na zona ultramáfica indica que os sulfetos não foram acumulados em um *trap*.

Relações com trabalhos anteriores

Cândia (1983) descreveu a petrografia do Complexo de Mangabal. O presente trabalho apresentou semelhanças e distinções em relação ao trabalho dela, os quais serão aqui discutidos. Cândia (1983) descreveu Mangabal I e Mangabal II como intrusões máfico-ultramáficas distintas por três razões: dados geofísicos não apresentam conexões em superfície, o volume do corpo sul é muito superior ao corpo norte e por ter encontrado bronzititos no corpo sul, e não localizar no corpo norte. Já o presente trabalho tratou os corpos como um único complexo pois, por se encontrar dentro de uma zona de cisalhamento, pode ser um corpo desmembrado e por ter uma sequência de cristalização, rochas e química mineral muito semelhantes.

Mangabal Norte é descrito por Cândia como uma intrusão máfico-ultramáfica de câmara invertida, composta por três tipos de rochas distintas: Olivina-cumulatos, chamados de peridotito feldspático; Olivina-plagioclásio cumulatatos, denominados de olivina-gabronorito e uma rocha composta por bronzita e plagioclásio cumulatatos, chamado de norito, do mais superficial ao mais profundo, respectivamente. Neste trabalho foram descritos o dunito feldspático e norito, ambos fazendo parte da Zona Máfica Superior, como Cândia encontrou porções menores de olivina-gabronorito, provavelmente é uma camada restrita da estratigrafia que não foi amostrada neste trabalho. O trabalho dela descreveu a câmara invertida devido à presença de olivina cumulatatos superior à de norito. Os furos em que Candia trabalhou chegaram no máximo a 120 metros, e eram bastante inclinados, chegando a 45°, ou seja, os furos não

chegaram até a Zona Ultramáfica, a qual começa a partir de 169 m abaixo do solo. O presente trabalho, ao amostrar furos com mais de 200 m pode mostrar que Mangabal apresenta uma porção ultramáfica sotoposta à Zona Máfica Superior.

Mangabal Sul é descrito como uma intrusão máfico-ultramáfica composta pela sequência, do mais basal para o topo: Olivina-cromo espinélio, com bronzititos subordinados, com transição pelos minerais cúmulos (de olivina para bronzita), sobreposta sobre uma sequência máfica de olivina gabro e acima uma sequência de norito. As mesmas rochas, com exceção da pequena camada de olivina gabro, foram encontradas neste trabalho, porém os nomes das rochas foram distintos, a transição que Candia chama de peridotito para bronzitito, aqui foi chamado de dunito e harzburgito.

Candia descreve um metamorfismo em fácies anfibolito superimposto às rochas do complexo, o qual teria atingido temperaturas na ordem de 700-780°C e pressões mínimas de 6 kbar. Estes dados permanecem condizentes com os encontrados no presente trabalho, o qual especificou ainda mais a pressão para valores aproximados de 8,5 kbar. Candia não descreveu cianita, o que foi fundamental para a especificação de pressão com valor elevado.

2. Conclusão

A caracterização geológica e petrológica forneceu novas informações sobre o o Complexo de Mangabal e seu e o contexto regional. As principais conclusões deste estudo são as seguintes:

1. O complexo é dividido em dois corpos: corpo sul e corpo norte, sendo classificados como um mesmo complexo devido à sua semelhança químico-petrográfica.
2. O complexo apresenta estratigrafia normal de cristalização, não apresentando inversão.
3. Dados petrológicos sugerem que a sequência de cristalização do complexo é olivina + cromo-espinélio > olivina + ortopiroxênio > ortopiroxênio + plagioclásio > clinopiroxênio. O conteúdo de forsterita em olivina cumulus ao longo do complexo varia de 78 a 85, sugerindo um magma parental moderadamente primitivo.
4. O pico do metamorfismo regional que afetou o Complexo de Mangabal atingiu fácies anfibolito de alta pressão, em condições de temperatura entre 727 e 747°C e pressões de aproximadamente ~8,5 Kbar.

5. Neste trabalho se tem o primeiro registro de cianita e ortoanfibolio ocorrendo concomitantemente em anfibolito, em intrusões acamadadas máficas-ultramáficas do Arco de Arenópolis.
6. O ambiente ígneo é fértil para a mineralização disseminada de sulfeto e a deformação e o metamorfismo que afetaram o Complexo concentraram a mineralização.
7. Os elementos do grupo da platina, principalmente o Paládio (Pd), estão concentrados nas zonas de cisalhamento no complexo.

Referências

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., de Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Rev.* 17, 1–29. doi:10.1016/0012-8252(81)90003-9
- Anderson, J. L. & Smith, D. R. 1995. The effect of temperature and oxygen fugacity on Al-in-hornblende barometry. *Am Mineral* 80, 549-59.
- Arnold, J.L. 1994. *Staurolite-kyanite-amphibolites: Calculated phase relations with application to amphibolites from the Harts Range , central Australia and the Zillertaler Alpen, Austria.* PhD Thesis. University of Adelaide
- Azer, M.K., Obeid, M.A., Gahlan, H.A. 2016. Late Neoproterozoic layered mafic intrusion of arc-affinity in the Arabian-Nubian Shield: A case study from the Shahira layered mafic intrusion, southern Sinai, Egypt. *Geological Acta*, 14 (3), 237-259. DOI: 10.1344/GeologicaActa2016.14.3.3
- Baker PM, Waugh RS. 2005. The role of surface geochemistry in the discovery of Babel and Nebo magmatic nickel-copper–PGE deposits. *Geochem Explor Environ Anal* 5:195–200
- Barnes, S.J., Cruden, A.R., Arndt, N., Saumur, B.M. 2016. The mineral system approach applied to magmatic Ni–Cu–PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 76: 296-316
- Beard, J.S., Barker, F., 1989. Petrology and tectonic significance of gabbros, tonalites, shoshonites, and anorthosites in a late Paleozoic arc-root complex in the Wrangellia Terrane, southern Alaska. *Journal of Geology* 97, 667–683.

- Bucher, K. e Grapes, R. 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 8ª Edição. 428 paginas. ISBN: 978-3-540-74169-5
- Campbell, I. H., 1985. The difference between oceanic and continental tholeiites: a fluid dynamic explanation. *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 91, 37-43.
- Candia M.A.F. 1983. *Petrologia dos Complexos Mafico-ultramaficos de Mangabal I e Mangabal II, Sanclerlândia, Goiás*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências Universidade de São Paulo, 400 p.
- Candia, M. A. F. ; Girardi, V. A. V. 1985. Geologia e petrologia dos complexos máfico-ultramáficos de Mangabal I e Mangabal II, Sanclerlândia, Goiás.. *Revista Brasileira de Geociências* , v. 15, n.3, p. 221-230, 1985.
- Casquet, C., Galindo, C., Tornos, F., Velasco, F., Canales, A., 2001. The Aguablanca Cu–Ni ore deposit (Extremadura, Spain), a case of synorogenic orthomagmatic mineralization: age and isotope composition of magmas (Sr, Nd) and ore (S). *Ore Geology Reviews* 18, 237–250.
- Danni, J.C.M., Dardenne, M.A., Fuck, R.A. e Ribeiro, M.J. (1973). Geologia da Extremidade sudoeste da Serra Dourada. *Rev. Bras. Geoc.*, vol. 3: 160-180.
- Danni, JCM. e Fuck, R.A. 1981. Unidades Tectono-Estratigráficas do embasamento das faixas dobradas da margem ocidental do cráton do São Francisco. In... *Anais do Simpósio sobre o cráton do São Francisco e suas faixas marginais*. Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador, pgs. 130-139
- Danni, J.C.M., Fuck, R.A., Leonardos, O.H., 1982. Archaean and Lower Proterozoic units in Central Brazil. *Geol. Rundschau* 71, 291–317. doi:10.1007/BF01825043
- Danni, J.C.M. e Teixeira, N.A. 1981. Características e sistematização das associações de rochas máficas e ultramáficas pré-cambrianas do Estado de Goiás. *Ata do 1º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia, S.G.B.*, 376-403.
- Della Giustina, M. E. S. 2010. *Geocronologia e significado tectônico de rochas máficas de alto grau metamórfico da Faixa Brasília*. 2010. xiii. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Brasília, 2010. 121.

- Gioia, S.M.C.L. (1997). *Preparação da Metodologia Sm-Nd para Datação de Amostras Geológicas e sua Aplicação em Rochas das Áreas de Firminópolis, Fazenda Nova e Americano do Brasil – GO*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Gioia SMCL, Pimentel MM (2000) The Sm-Nd isotopic method in the Geochronology Laboratory of the University of Brasília. *Ann Acad Bras Cienc* 72:219–245
- Holland, T. & Blundy, J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib Mineral Petrol* 116, 433-47.
- Hollanda, M.H.B.M., Pimentel, M.M., Armstrong, R., 2003. Isotopic and geochronological constraints for the origins of syn- to post-Brasiliano mafic magmatism and crustal remelting in the Brasília Belt (Central Brazil). In: SSAGI, IV, Salvador, Brazil, Short Papers 1, pp. 198–201.
- Irvine, T.N., 1967. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part 2. Petrologic applications. *Canadian Journal of Earth Sciences* 4, 71–103.
- Irvine, T.N. 1982. Terminology for layered intrusions. *J Petrol* 23:127–162. doi: 10.1093/petrology/23.2.127-a
- Jesus, A.P., Mateus, A., Munhá, J.M., Tassinari, C. 2014. Internal architecture and Fe-Ti-V oxide ore genesis in a Variscan synorogenic layered mafic intrusion, the Beja Layered Gabbroic Sequence (Portugal). *Lithos*. Vol 190–191. (2014). Pag. 111–136.
- Junges, L., Pimentel, M., Moraes, R. De, 2002. Nd isotopic study of the Neoproterozoic Mara Rosa Arc, central Brazil: implications for the evolution of the Brasí. *Precambrian Res.* 117, 101–118.
- Kelemen, P.B. & Ghiorso, M.S. Assimilation of peridotite in zoned calc-alkaline plutonic complexes: evidence from the Big Jim complex, Washington Cascades. *Contr. Mineral. and Petrol.* (1986) 94: 12. <https://doi.org/10.1007/BF00371222>
- Laux, J.H. (2004). *Evolução do Arco Magmático de Goiás com base em dados geocronológicos U-Pb e Sm-Nd*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília.
- Laux, J.H., Pimentel, M.M., Dantas, E.L., Armstrong, R., Junges, S.L., 2005. Two

- Neoproterozoic crustal accretion events in the Brasília belt, central Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 18, 183–198. doi:10.1016/j.jsames.2004.09.003
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J.A., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W., Youzhi, G., 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, 219–246.
- Loucks, R.R., 1990. Discrimination of ophiolitic from non-ophiolitic ultramafic–mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene. *Geology* 18, 346–349.
- Macedo, H.A.O., 2016. Mineralogia e Petrologia do depósito hidrotermal de Vermiculita de São Luís de Montes Belos, Arco Magmático de Goiás. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 64 p.
- Maia, S. K. W. 2016. Magmatismo E Evolução Metamórfica Do Complexo Anápolis-Itauçu na Região de Damolândia, Goiás. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília. 113 p.
- Maier, W.D., Barnes, S.J., Chinyepi, G., 2008. The composition of magmatic Ni–Cu–(PGE) sulfide deposits in the Tati and Selebi-Phikwe belts of eastern Botswana. *Miner Deposita* 43: 37. DOI: 10.1007/s00126-007-0143-5
- Maier WD, Smithies RH, Spaggiari C. V. , Barnes SJ, Kirkland CL, Yang S, Lahaye Y, Kiddie O, MacRae C (2016) Petrogenesis and Ni-Cu sulphide potential of mafic-ultramafic rocks in the Mesoproterozoic Fraser Zone within the Albany-Fraser Orogen, Western Australia Albany Fraser, *Precambrian Research*, 281, 27–46.
- McCallum IS (2002). The Stillwater Complex: a review of the geology. In: 9th International Platinum Symposium, Geology and Guide Stillwater Complex, Montana, USA, Billings. p 21–25
- Mota e Silva, J., 2009. O Complexo Máfico-ultramáfico Acamadado de Americano do Brasil e sua mineralização de Ni-Cu-Co. Tese de mestrado. Universidade de Brasília.

- Mota e Silva, J., Ferreira Filho, C.F., Bühn, B. Dantas, E.L. 2011. Geology, petrology and geochemistry of the “Americano do Brasil” layered intrusion, central Brazil, and its Ni–Cu sulfide deposits. *Miner Deposita* (2011) 46: 57. DOI:10.1007/s00126-010-0312-9
- Naldrett AJ (1997) Key factors in the genesis of Noril’sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey’s Bay, and other world-class Ni–CuPGE deposits: implications for exploration. *Aust J Earth Sci* 44:283–315
- Naldrett, A.J. (2004). *Magmatic Sulfide Deposits – Geology, Geochemistry and Exploration*. Springer, Berlin, Germany. 724 pp.
- Nilson, A.A. 1981. The nature of Americano do Brasil mafic-ultramafic complex and associated sulfide mineralization, Goiás, Brazil. PhD Thesis, University of Western Ontario, 460pp.
- Nilson A.A, Gioia S., Pimentel M.M. 1997. Idade Sm-Nd do Complexo Máfico-Ultramáfico de Americano do Brasil, Goiás e características isotópicas das rochas encaixantes. *Anais, VI Cong. Bras. Geoquím., Salvador, SBGq*, pp.643-645.
- Nilson AA, Santos MM, Cuba EA, Sá CMG 1986. , Goiás. In: Schobbenhaus C, Coelho CES (eds) *Principais Depósitos Minerais do Brasil II*. 257–273.
- Nunes, N.S.V. 1990. Geologia e potencial mineral da região de Anicuns, Goiás. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Dissertação de mestrado, 188 p. Olivatti O. 2003. Relatório de Pesquisa de Reavaliação, Município de Sanclerlândia. Inédito. 19 p. ^[1]_{S&EP}
- Oliveira, C.G., Oliveira, F. B., Della Giustina, M. E. S., Marques, G. C., Dantas, E. L., Pimental, M. M., Buhn, B. M. 2015. The Chapada Cu–Au deposit, Mara Rosa magmatic arc, Central Brazil: Constraints on the metallogensis of a Neoproterozoic large porphyry-type deposit. *Ore Geology Reviews* 72. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.06.021
- Pfrimer, A.A., Candia, M.A.F. e Teixeira, N.A. (1981). Geologia e Mineralizações de níquel-cobre-cobalto dos complexos máfico-ultramáficos de Mangabal I e II. Ata do 1º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Goiania, Goiás. *Soc. Bras. de Geol.*, 495-518.
- Pimentel, M.M., 2016. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazilian J. Geol.* 46, 67–82. doi:10.1590/2317-4889201620150004

- Pimentel MM, Ferreira Filho CF, Armstrong SA (2004) SHRIMP U–Pb and Sm–Nd ages of the Niquelândia layered complex: Meso- (125 Ga) and Neoproterozoic (079 Ga) extensional events in Central Brazil. *Prec Res* 132:133–153
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., 1992. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology* 20, 375. doi:10.1130/0091-7613(1992)020<0375:NCAICB>2.3.CO;2
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Botelho, N.F., 1999. Granites and the geodynamic history of the Neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: A review. *Lithos* 46, 463–483. doi:10.1016/S0024-4937(98)00078-4
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Jost, H., Ferreira Filho, C.F., Araújo, S.M., 2000a. The basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. *Tecton. Evol. South Am.* 195–229.
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Gioia, D.M.C.L., 2000b. The Neoproterozoic Goiás Magmatic Arc, Central Brazil: A review and new Sm–Nd isotopic data. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(1): 35-39.
- Pimentel, M.M., Whitehouse, M.J., Viana, M.G., Fuck, R.A., Machado, N., 1997. The Mara Rosa arc in the Tocantins Province: further evidence for Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil, *Precambrian Research*, 81: 299-310
- Poirier, G. 1988. Étude métallogénique de gîtes de nickel, cuivre et platinoïdes de l'ouest de la province de Grenville, Québec. Thèse de maîtrise. Université du Québec à Montreal, Montréal.
- Ribeiro, M.J., Pfrimer, A.A., Sá, C.M.G. 1974. Geologia e Geoquímica de semi-detalle do maciço máfico-ultramáfico de Mangabal I, Sanclerlândia, GO. Ata do 28º Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, RS, 239-249.
- Sappin A-A, Constantin M, Clark T, van Breemen O. 2009. Geochemistry, geochronology, and geodynamic setting of Ni– Cu±PGE mineral prospects hosted by mafic and ultramafic intrusions in the Portneuf–Mauricie Domain, Grenville Province, Quebec. *Can J Earth Sci* 46:331–353
- Silva, F.O., 1991. Geologia, estrutura, petrologia e mineralização de Fe, Ti e V associadas ao complexo gabro-anortosítico acamadado de Santa Bárbara (Goiás). Unpublished M.S.c

thesis, University de Brasília, 190 p. (In Portuguese).

Suvanto, K. 2014. Geology of the Pikku-Vaiskonselkä differentiated sill in the Kevitsa area, northern Finland. Dissertação de mestrado. University of Oulu.

Tornos, F., Casquet, C., Galindo, C., Velasco, F., Canales, A., 2001. A new style of Ni–Cu mineralization related to magmatic breccia pipes in a transpressional magmatic arc, Aguablanca, Spain. *Mineralium Deposita* 36, 700–706. Doi:10.1007/s001260100204

Valeriano, C.M., Pimentel, M.M., Heilbron, M., Almeida, J.C.H., Trouw, R.A.J., 2008. Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 294, 197–210. doi:10.1144/SP294.11

Votorantim Metais (2012). Projeto Anicuns, relatório interno da Votorantim Metais de dezembro de 2012, 192 pp.

ANEXO

Tabelas

Microprobe data for olivine

Rock	Feldspathic Peridotite						Harzburgite													
Sample No.	MNS14 1	MNS14 2	MNS14 3	MNS14 5	MNS14 6	MNS14 7	MNS18 1	MNS18 2	MNS19 1	MNS19 2	MNS19 3	MNN05 1	MNN05 2	MNN05 3	MNN05 4	MNN05 5	MNN05 6	MNN06 1	MNN06 2	
SiO ₂	39,61	39,30	39,20	40,29	40,00	39,84	39,36	39,28	38,49	38,41	37,94	39,64	38,85	39,23	39,78	38,85	40,14	39,38	39,41	
TiO ₂	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,12	0,09	0,08	0,11	0,00	0,00	0,03	0,03	0,17	
Al ₂ O ₃	0,04	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,10	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,18	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	
FeO	16,63	16,57	16,45	16,27	16,26	16,55	16,12	16,17	18,29	18,19	14,39	16,91	17,42	16,75	16,23	16,00	16,32	20,14	20,16	
MnO	0,20	0,17	0,30	0,27	0,27	0,26	0,27	0,19	0,26	0,22	0,22	0,17	0,12	0,30	0,15	0,25	0,16	0,35	0,27	
MgO	43,86	43,34	42,54	43,62	44,24	43,61	43,49	42,79	42,11	40,90	46,37	42,18	41,73	41,49	41,61	42,56	41,08	40,11	40,34	
CaO	0,02	0,01	0,05	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,08	0,00	0,01	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	
Na ₂ O	0,05	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00	0,02	0,02	
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03	0,05	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,00	0,04	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	
NiO	0,27	0,28	0,28	0,28	0,25	0,32	0,42	0,43	0,31	0,35	0,46	0,22	0,26	0,22	0,21	0,37	0,17	0,25	0,19	
V ₂ O ₃	0,00	0,01	0,03	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,05	0,04	0,01	0,00	0,00	0,03	0,04	0,02	0,05	0,00	0,00	
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	0,03	0,00	0,01	na	0,05	0,05	0,00	
Total	100,72	99,73	98,86	100,75	101,06	100,66	99,80	98,97	99,66	98,19	99,97	99,29	98,52	98,22	98,10	98,07	98,03	100,34	100,58	
Number of cations per 4 oxygens																				
Si	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,96	1,01	1,00	1,01	1,02	1,00	1,03	1,01	1,01	
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fe ⁺²	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34	0,35	0,34	0,35	0,39	0,40	0,30	0,36	0,38	0,36	0,35	0,35	0,35	0,43	0,43	
Mn	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	
Mg	1,64	1,64	1,62	1,63	1,65	1,64	1,65	1,63	1,61	1,59	1,75	1,60	1,61	1,60	1,60	1,64	1,58	1,53	1,54	
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fo	82,5	82,3	82,2	82,7	82,9	82,4	82,8	82,5	80,4	80,0	85,2	81,6	81,0	81,5	82,0	82,6	81,8	78,0	78,1	
Fa	17,5	17,7	17,8	17,3	17,1	17,6	17,2	17,5	19,6	20,0	14,8	18,4	19,0	18,5	18,0	17,4	18,2	22,0	21,9	

Microprobe data for olivine

Sample No.	Harzburgite					Peridotite													
	MNN06 3	MNN06 4	MNN20 1	MNN20 2	MNN20 3	MNN01 1	MNN01 2	MNN02 1	MNN02 2	MNN02 3	MNN03 1	MNN03 2	MNN03 3	MNN03 4	MNN03 5	MNN03 6	MNN03 7	MNN03 8	MNN03 9
SiO ₂	39,18	39,40	38,86	38,94	39,04	38,47	38,93	38,59	38,30	38,32	39,95	40,05	40,41	40,34	40,01	40,57	40,43	39,90	40,13
TiO ₂	0,00	0,30	0,03	0,00	0,00	0,20	0,16	0,06	0,00	0,09	0,00	0,12	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	0,02
Al ₂ O ₃	0,01	0,03	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00
Cr ₂ O ₃	0,05	0,08	0,00	0,02	0,01	0,13	0,02	0,06	0,05	0,06	0,00	0,02	0,00	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	20,21	20,18	19,30	19,46	19,07	15,98	16,22	15,94	15,86	15,92	17,02	17,78	16,75	17,35	16,94	16,30	17,04	17,08	16,48
MnO	0,14	0,20	0,38	0,26	0,28	0,28	0,31	0,20	0,13	0,27	0,29	0,29	0,29	0,24	0,21	0,21	0,31	0,34	0,34
MgO	40,49	40,72	39,77	40,36	39,72	43,31	43,28	43,15	43,66	43,53	43,94	42,54	43,07	42,50	43,27	43,26	42,52	42,63	43,24
CaO	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,17	0,02	0,02	0,00	0,03	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,05	0,00
Na ₂ O	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,06	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02	0,05	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
NiO	0,17	0,26	0,17	0,15	0,17	0,28	0,18	0,25	0,32	0,19	0,23	0,26	0,27	0,29	0,30	0,27	0,23	0,19	0,25
V ₂ O ₃	0,04	0,03	0,04	0,02	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,00	0,03	0,02	0,01	0,00	0,05	0,00	0,00
P ₂ O ₅	0,00	0,04	na	na	na	na	na	na	na	na	0,00	0,00	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
Total	100,29	101,28	98,55	99,24	98,33	98,92	99,19	98,30	98,38	98,52	101,48	101,11	101,07	100,86	100,80	100,67	100,63	100,54	100,49
Number of cations per 4 oxygens																			
Si	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,01	1,01
Ti	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ⁺²	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42	0,34	0,35	0,34	0,34	0,34	0,36	0,37	0,35	0,36	0,36	0,34	0,36	0,36	0,35
Mn	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Mg	1,55	1,54	1,54	1,56	1,54	1,65	1,65	1,66	1,68	1,67	1,64	1,59	1,61	1,59	1,62	1,62	1,59	1,60	1,62
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fo	78,1	78,2	78,6	78,7	78,8	82,8	82,6	82,8	83,1	83,0	82,1	81,0	82,1	81,4	82,0	82,6	81,6	81,7	82,4
Fa	21,9	21,8	21,4	21,3	21,2	17,2	17,4	17,2	16,9	17,0	17,9	19,0	17,9	18,6	18,0	17,4	18,4	18,3	17,6

Microprobe data for olivine

Sample No.	Peridotite										
	MNN03 10	MNN03 11	MNN03 12	MNN03 13	MNN03 14	MNN03 15	MNN03 16	MNN03 17	MNN03 18	MNN03 19	MNN03 20
SiO ₂	39,99	40,11	40,16	39,68	39,81	39,73	39,20	38,66	39,14	39,36	38,09
TiO ₂	0,00	0,08	0,32	0,09	0,00	0,13	0,01	0,08	0,00	0,02	0,22
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,02
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,10	0,04	0,01	0,07	0,08	0,06	0,03	0,09
FeO	16,74	16,74	16,90	17,07	16,76	17,02	15,35	15,41	14,69	16,80	14,89
MnO	0,08	0,18	0,26	0,24	0,10	0,24	0,25	0,35	0,27	0,24	0,36
MgO	43,03	42,59	42,10	42,33	42,78	42,30	43,98	43,46	43,83	41,32	44,05
CaO	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,11	0,04	0,02	0,03
Na ₂ O	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,02	0,00	0,10	0,02	0,00	0,03
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,02	0,01
NiO	0,31	0,32	0,29	0,26	0,20	0,25	0,22	0,17	0,19	0,26	0,26
V ₂ O ₃	0,00	0,03	0,00	0,05	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04
P ₂ O ₅	0,04	0,07	0,04	0,00	0,09	0,03	na	na	na	0,02	na
Total	100,20	100,14	100,10	99,87	99,81	99,81	99,07	98,74	98,24	98,13	98,07
Number of cations per 4 oxygens											
Si	1,01	1,01	1,02	1,01	1,01	1,01	1,00	0,99	1,00	1,02	0,98
Ti	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Fe ⁺²	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,33	0,33	0,31	0,36	0,32
Mn	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mg	1,62	1,60	1,59	1,60	1,62	1,60	1,67	1,66	1,67	1,59	1,69
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fo	82,085	81,935	81,617	81,550	81,980	81,583	83,627	83,406	84,172	81,433	84,062
Fa	17,915	18,065	18,383	18,450	18,020	18,417	16,373	16,594	15,828	18,567	15,938

Microprobe data for Ca-Amphibole

Rock Sample No.	Harzburgite					Peridotite MNN02	Feldspathic Peridotite		Norite				
	MNS18 1	MNS18 2	MNS19 3	MNN05 1	MNN06 1		MNS14 1	MNS07 1	MNS07 2	MNS07 3	MNS09 1	MNS09 2	
SiO ₂	43,10	44,55	50,32	43,17	41,80	42,47	42,27	50,81	52,00	52,04	51,62	54,26	
TiO ₂	0,13	0,18	0,33	0,34	0,31	3,98	0,00	0,98	0,68	0,50	0,34	0,17	
Al ₂ O ₃	14,97	13,42	3,92	15,54	18,47	12,19	17,49	6,53	6,06	6,08	7,40	3,58	
Cr ₂ O ₃	0,00	0,08	0,22	0,00	0,00	0,51	0,00	0,05	0,16	0,23	0,28	0,27	
FeO	6,66	6,75	4,09	5,82	7,01	5,13	5,60	7,88	7,41	7,76	7,02	6,33	
MnO	0,20	0,07	0,00	0,15	0,14	0,04	0,13	0,13	0,11	0,19	0,17	0,14	
MgO	17,31	16,99	17,91	20,30	16,14	16,32	16,12	17,55	18,57	18,21	17,92	19,29	
CaO	11,62	11,51	19,35	8,14	9,44	11,42	11,20	12,03	11,36	11,87	11,81	12,17	
Na ₂ O	2,56	2,76	0,83	3,61	3,88	2,86	3,02	0,81	0,52	0,47	0,70	0,35	
K ₂ O	0,24	0,22	0,06	0,32	0,20	1,38	0,54	0,39	0,20	0,18	0,20	0,11	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,00	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	
NiO	0,17	0,07	0,05	0,13	0,07	0,08	0,02	0,10	0,13	0,09	0,12	0,07	
V ₂ O ₃	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,08	0,00	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	
H ₂ O*	2,12	2,11	2,08	2,14	2,12	2,05	2,11	2,12	2,16	2,15	2,16	2,15	
O=F,Cl	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total	99,84	99,44	99,18	100,31	100,38	98,45	99,11	99,80	100,18	100,49	100,33	99,27	
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+													
Si	6,10	6,32	7,23	6,03	5,87	6,19	6,01	7,16	7,21	7,23	7,17	7,58	
Al iv	1,90	1,68	0,66	1,97	2,13	1,81	1,99	0,84	0,79	0,77	0,83	0,42	
Al vi	0,60	0,56	0,00	0,59	0,93	0,29	0,93	0,25	0,20	0,22	0,38	0,17	
Ti	0,01	0,02	0,04	0,04	0,03	0,44	0,00	0,10	0,07	0,05	0,04	0,02	
Cr	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	
Fe3+	0,79	0,77	0,00	0,68	0,82	0,00	0,67	0,46	0,86	0,73	0,62	0,42	
Fe2+	0,00	0,03	0,49	0,00	0,00	0,63	0,00	0,47	0,00	0,17	0,20	0,32	
Mn	0,02	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	
Mg	3,65	3,59	3,84	4,23	3,38	3,55	3,41	3,69	3,84	3,77	3,71	4,02	
Ni	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Ca	1,76	1,75	2,98	1,22	1,42	1,78	1,70	1,82	1,69	1,77	1,76	1,82	
Na	0,70	0,76	0,23	0,98	1,06	0,81	0,83	0,22	0,14	0,13	0,19	0,10	
K	0,04	0,04	0,01	0,06	0,04	0,26	0,10	0,07	0,04	0,03	0,04	0,02	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
OH*	2,00	2,00	1,99	2,00	1,99	1,99	2,00	2,00	2,00	1,99	2,00	2,00	
Calculation scheme	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	
(Ca+Na) (B)	1,90	2,00	2,98	1,43	1,81	2,00	1,97	2,00	1,83	1,89	1,95	1,92	
Na (B)	0,13	0,25	0,00	0,21	0,39	0,22	0,27	0,18	0,14	0,13	0,19	0,10	
(Na+K) (A)	0,61	0,55	0,24	0,83	0,70	0,85	0,66	0,11	0,04	0,03	0,04	0,02	
Mg/(Mg+Fe2)	1,00	0,99	0,89	1,00	1,00	0,85	1,00	0,89	1,00	0,96	0,95	0,93	
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,57	0,58	0,00	0,53	0,47	0,00	0,42	0,65	0,81	0,77	0,62	0,71	
Classification	Magnesio-hastingsite	magnesio-hastingsitic hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hastingsite	pargasite	Pargasite	pargasite	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	tremolite	

Cont. Microprobe data for Ca-Amphibole

Sample No.	Norite											
	MNS11 1	MNS11 2	MNS11 3	MNS11 4	MNS11 6	MNS11 7	MNS12 1	MNS12 2	MNS12 3	MNS12 4	MNS16 1	
SiO ₂	47,14	49,77	51,53	51,88	52,97	53,28	44,57	46,14	46,76	45,05	52,46	
TiO ₂	0,71	0,52	0,13	0,20	0,04	0,25	0,21	0,53	0,52	0,12	0,67	
Al ₂ O ₃	10,89	8,49	8,33	8,15	6,76	5,01	14,31	13,35	12,78	13,62	6,32	
Cr ₂ O ₃	0,86	0,17	0,19	0,24	0,11	0,33	0,34	0,02	0,16	0,39	0,76	
FeO	9,64	8,77	7,35	7,29	7,19	6,46	11,65	9,61	9,10	10,39	4,75	
MnO	0,21	0,14	0,22	0,16	0,16	0,00	0,31	0,16	0,27	0,21	0,06	
MgO	14,53	16,52	17,70	18,43	18,72	19,07	12,47	14,29	14,50	13,33	19,52	
CaO	11,67	11,57	11,45	11,58	11,49	12,28	10,43	10,87	10,65	10,64	12,22	
Na ₂ O	1,05	0,77	0,64	0,70	0,58	0,47	1,98	1,97	1,87	2,01	0,86	
K ₂ O	0,41	0,24	0,24	0,23	0,21	0,13	0,16	0,29	0,24	0,25	0,03	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,10	0,02	0,05	0,06	0,00	
NiO	0,12	0,14	0,10	0,07	0,06	0,07	0,03	0,02	0,04	0,05	0,04	
V ₂ O ₃	0,12	0,08	0,07	0,01	0,00	0,06	0,06	0,01	0,02	0,04	0,08	
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	
H ₂ O*	2,10	2,13	2,18	2,20	2,19	2,16	2,06	2,11	2,11	2,07	2,17	
O=F,Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	
Total	99,85	99,92	100,83	101,94	101,27	99,95	99,41	100,03	99,70	98,87	100,25	
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+												
Si	6,72	7,00	7,10	7,07	7,24	7,41	6,40	6,54	6,62	6,49	7,24	
Al iv	1,28	1,00	0,90	0,93	0,76	0,59	1,60	1,46	1,38	1,51	0,76	
Al vi	0,55	0,40	0,45	0,38	0,33	0,23	0,83	0,76	0,75	0,80	0,27	
Ti	0,08	0,06	0,01	0,02	0,00	0,03	0,02	0,06	0,06	0,01	0,07	
Cr	0,10	0,02	0,02	0,03	0,01	0,04	0,04	0,00	0,02	0,04	0,08	
Fe3+	0,55	0,74	0,81	0,83	0,82	0,47	0,89	0,69	0,71	0,75	0,42	
Fe2+	0,60	0,29	0,03	0,00	0,00	0,28	0,51	0,45	0,36	0,50	0,13	
Mn	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,00	0,04	0,02	0,03	0,03	0,01	
Mg	3,09	3,46	3,63	3,74	3,82	3,95	2,67	3,02	3,06	2,86	4,02	
Ni	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	
Ca	1,78	1,74	1,69	1,69	1,68	1,83	1,61	1,65	1,62	1,64	1,81	
Na	0,29	0,21	0,17	0,18	0,15	0,13	0,55	0,54	0,51	0,56	0,23	
K	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,03	0,05	0,04	0,05	0,01	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	
OH*	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,97	2,00	1,99	1,98	2,00	
Calculation scheme	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	
(Ca+Na) (B)	2,00	1,95	1,86	1,87	1,84	1,95	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
Na (B)	0,22	0,21	0,17	0,18	0,15	0,13	0,39	0,35	0,38	0,36	0,19	
(Na+K) (A)	0,15	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,19	0,24	0,17	0,25	0,04	
Mg/(Mg+Fe2)	0,84	0,92	0,99	1,00	1,00	0,93	0,84	0,87	0,89	0,85	0,97	
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,50	0,65	0,64	0,69	0,71	0,67	0,52	0,48	0,49	0,49	0,61	
Classification	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	tremolitic hornblende	tschermakitic hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	tschermakitic hornblende	magnesio-hornblende	

Cont. Microprobe data for Ca-Amphibole

Sample No.	Norite											
	MNS16 2	MNS16 3	MNS16 4	MNS16 5	MNS16 6	MNS16 7	MNS16 8	MNS16 9	MNS26 1	MNS26 2	MNS26 3	
SiO ₂	43,95	44,05	43,68	43,80	44,59	52,45	46,59	47,18	49,55	54,25	53,97	
TiO ₂	0,06	0,28	0,16	0,15	0,12	0,27	0,50	0,13	0,41	0,41	0,05	
Al ₂ O ₃	18,23	16,75	17,38	16,81	15,51	6,44	13,79	12,16	6,78	3,52	3,74	
Cr ₂ O ₃	0,05	0,01	0,00	0,00	0,14	0,78	0,39	0,19	0,20	0,00	0,11	
FeO	6,40	6,25	6,93	6,40	6,36	6,30	6,92	7,51	8,83	8,31	8,27	
MnO	0,06	0,07	0,12	0,06	0,04	0,07	0,06	0,22	0,15	0,33	0,06	
MgO	14,10	15,18	15,39	15,13	15,52	19,06	15,95	17,06	14,54	18,20	18,26	
CaO	12,03	11,75	11,59	11,56	11,55	11,43	11,01	10,29	15,40	12,18	12,13	
Na ₂ O	1,67	1,73	1,84	1,69	1,88	0,72	1,89	1,56	0,84	0,38	0,26	
K ₂ O	0,38	0,37	0,36	0,37	0,31	0,12	0,26	0,18	0,16	0,03	0,07	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	
NiO	0,09	0,17	0,20	0,17	0,17	0,14	0,10	0,14	0,01	0,05	0,01	
V ₂ O ₃	0,02	0,06	0,00	0,00	0,03	0,02	0,00	0,06	0,08	0,00	0,02	
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	
H ₂ O*	2,12	2,12	2,15	2,12	2,11	2,18	2,15	2,14	2,07	2,15	2,14	
O=F,Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total	99,49	99,29	100,57	98,93	98,91	100,66	100,32	99,58	98,93	100,23	99,55	
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+												
Si	6,21	6,22	6,10	6,20	6,32	7,22	6,50	6,61	7,19	7,57	7,57	
Al iv	1,79	1,78	1,90	1,80	1,68	0,78	1,50	1,39	0,81	0,43	0,43	
Al vi	1,24	1,01	0,96	1,01	0,91	0,26	0,76	0,62	0,35	0,15	0,19	
Ti	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,05	0,01	0,04	0,04	0,01	
Cr	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,04	0,02	0,02	0,00	0,01	
Fe3+	0,36	0,61	0,81	0,72	0,64	0,72	0,74	0,88	0,00	0,43	0,49	
Fe2+	0,40	0,12	0,00	0,03	0,11	0,00	0,06	0,00	1,07	0,54	0,48	
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,04	0,01	
Mg	2,97	3,20	3,20	3,19	3,28	3,91	3,32	3,57	3,14	3,79	3,82	
Ni	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	
Ca	1,82	1,78	1,73	1,75	1,75	1,69	1,65	1,55	2,39	1,82	1,82	
Na	0,46	0,47	0,50	0,46	0,52	0,19	0,51	0,42	0,23	0,10	0,07	
K	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,02	0,05	0,03	0,03	0,00	0,01	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OH*	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
Calculation scheme	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	
(Ca+Na) (B)	2,00	2,00	1,97	2,00	2,00	1,88	2,00	1,86	2,39	1,92	1,89	
Na (B)	0,18	0,22	0,23	0,25	0,25	0,19	0,35	0,31	0,00	0,10	0,07	
(Na+K) (A)	0,35	0,32	0,33	0,28	0,33	0,02	0,20	0,15	0,26	0,00	0,01	
Mg/(Mg+Fe2)	0,88	0,96	1,00	0,99	0,97	1,00	0,98	1,00	0,75	0,88	0,89	
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,22	0,38	0,46	0,42	0,41	0,73	0,49	0,59	0,00	0,74	0,72	
Classification	tschermakite	tschermakite	tschermakite	tschermakite	tschermakitic hornblende	magnesio-hornblende	tschermakitic hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	actinolite	actinolite	

Cont. Microprobe data for Ca-Amphibole

Sample No.	Norite													
	MNS26 4	MNN14 1	MNN14 2	MNN14 3	MNN14 4	MNN16 6	MNN16 7	MNN16 8	MNN16 9	MNN16 10	MNN16 11	MNN16 12	MNN16 13	MNN16 14
SiO ₂	48,41	44,38	53,35	53,22	53,70	43,17	44,46	44,09	42,24	44,68	44,58	43,59	44,62	45,26
TiO ₂	0,83	1,19	0,27	0,34	0,33	0,06	0,29	0,14	0,65	0,20	0,00	0,57	0,00	0,99
Al ₂ O ₃	10,56	13,74	4,47	4,54	4,06	17,61	16,79	16,63	16,59	16,44	16,39	16,19	16,14	13,58
Cr ₂ O ₃	0,21	0,43	0,20	0,32	0,18	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,10	0,00	0,19
FeO	9,49	10,60	7,69	6,63	7,83	9,49	9,29	8,15	11,90	9,91	8,78	9,70	8,20	9,74
MnO	0,13	0,13	0,17	0,17	0,13	0,11	0,16	0,08	0,11	0,14	0,17	0,31	0,13	0,09
MgO	16,62	13,39	18,57	18,61	18,08	12,75	13,36	14,13	11,25	13,07	13,53	13,28	14,40	13,71
CaO	9,62	11,23	12,01	12,21	11,04	11,16	11,36	11,25	11,51	11,18	11,08	10,98	11,27	11,30
Na ₂ O	0,99	1,86	0,52	0,59	0,59	1,71	1,63	1,78	1,78	1,65	1,57	1,80	1,84	1,53
K ₂ O	0,26	0,54	0,11	0,03	0,05	0,50	0,50	0,49	0,55	0,50	0,42	0,46	0,46	0,52
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
NiO	0,09	0,01	0,12	0,07	0,00	0,04	0,03	0,00	0,07	0,03	0,06	0,07	0,04	0,01
V ₂ O ₃	0,03	0,15	0,01	0,06	0,11	0,02	0,02	0,00	0,06	0,02	0,01	0,13	0,00	0,05
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
H ₂ O*	2,15	2,09	2,15	2,13	2,13	2,10	2,13	2,11	2,06	2,06	1,96	1,88	1,82	1,74
O=F,Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,42	100,16	100,18	99,19	98,73	99,37	100,64	99,52	99,16	100,96	99,50	100,02	99,83	99,74
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+														
Si	6,74	6,36	7,43	7,47	7,55	6,16	6,26	6,25	6,16	6,51	6,83	6,96	7,35	7,78
Al iv	1,26	1,64	0,57	0,53	0,45	1,84	1,74	1,75	1,84	1,49	1,17	1,04	0,65	0,22
Al vi	0,47	0,68	0,16	0,23	0,22	1,13	1,05	1,03	1,01	1,34	1,79	2,00	2,49	2,53
Ti	0,09	0,13	0,03	0,04	0,03	0,01	0,03	0,01	0,07	0,02	0,00	0,07	0,00	0,13
Cr	0,02	0,05	0,02	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03
Fe3+	1,10	0,60	0,58	0,35	0,65	0,71	0,67	0,71	0,49	1,21	1,13	1,29	1,13	1,40
Fe2+	0,00	0,67	0,31	0,43	0,27	0,42	0,43	0,26	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01
Mg	3,45	2,86	3,86	3,90	3,79	2,71	2,81	2,98	2,44	2,84	3,09	3,16	3,54	3,51
Ni	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
Ca	1,43	1,72	1,79	1,84	1,66	1,71	1,71	1,71	1,80	1,74	1,82	1,88	1,99	2,08
Na	0,27	0,52	0,14	0,16	0,16	0,47	0,44	0,49	0,50	0,47	0,46	0,56	0,59	0,51
K	0,05	0,10	0,02	0,01	0,01	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,08	0,09	0,10	0,11
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OH*	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Calculation scheme	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13
(Ca+Na) (B)	1,70	2,00	1,93	2,00	1,82	2,00	2,00	2,00	2,00	1,74	1,82	1,88	1,99	2,08
Na (B)	0,27	0,28	0,14	0,16	0,16	0,29	0,29	0,29	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(Na+K) (A)	0,05	0,34	0,02	0,01	0,01	0,27	0,25	0,29	0,40	0,56	0,55	0,65	0,68	0,63
Mg/(Mg+Fe2)	1,00	0,81	0,92	0,90	0,93	0,87	0,87	0,92	0,72	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,70	0,47	0,78	0,61	0,74	0,39	0,39	0,41	0,33	0,47	0,39	0,39	0,31	0,36
		0,69	0,81	0,83	0,80	0,71	0,72	0,76	0,63	0,70	0,73	0,71	0,76	0,72
Classification	magnesio-hornblende	tschermakitic hornblende	tremolitic hornblende	tremolitic hornblende	tremolite	tschermakite	tschermakitic hornblende	tschermakite	tschermakite	edenitic hornblende	edenite	edenite	silicic edenite	silicic edenite

Cont. Microprobe data for Ca-Amphibole

Sample No.	MNS08						Amphibolite				
	1	2	3	4	5	6	MNS22 3	MNS10 1	MNS10 2	MNS10 3	MNS10 4
SiO ₂	46,81	46,19	46,43	45,09	45,91	45,83	48,59	46,33	44,85	46,03	46,77
TiO ₂	0,38	0,39	0,36	0,29	0,56	0,53	0,17	0,37	0,32	0,23	0,07
Al ₂ O ₃	13,26	14,03	13,66	15,30	13,56	13,97	10,54	13,76	14,12	14,16	13,03
Cr ₂ O ₃	0,17	0,07	0,18	0,03	0,04	0,00	0,12	0,24	0,02	0,22	0,10
FeO	9,23	9,08	8,80	9,22	10,03	8,91	8,29	9,75	10,10	9,64	9,71
MnO	0,26	0,25	0,21	0,17	0,18	0,14	0,18	0,26	0,25	0,36	0,17
MgO	14,58	14,09	14,06	13,28	13,75	13,92	16,06	13,91	13,77	14,00	14,46
CaO	10,52	10,64	11,21	11,53	10,50	11,22	10,36	11,04	10,81	10,63	10,72
Na ₂ O	1,90	2,02	1,64	1,56	1,78	1,66	1,49	1,82	1,73	2,00	1,93
K ₂ O	0,20	0,25	0,18	0,24	0,18	0,18	0,19	0,20	0,22	0,24	0,18
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,01	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01
NiO	0,10	0,10	0,12	0,06	0,01	0,00	0,12	0,00	0,00	0,11	0,03
V ₂ O ₃	0,02	0,02	0,05	0,05	0,03	0,00	0,08	0,00	0,06	0,00	0,02
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
H ₂ O*	2,13	2,11	2,10	2,10	2,11	2,10	2,13	2,12	2,09	2,13	2,12
O=F,Cl	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Total	100,34	99,89	99,47	99,34	99,36	98,94	99,14	100,43	99,14	100,56	100,05
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+											
Si	6,57	6,53	6,59	6,44	6,53	6,55	6,84	6,54	6,41	6,48	6,60
Al iv	1,43	1,47	1,41	1,56	1,47	1,45	1,16	1,46	1,59	1,52	1,40
Al vi	0,76	0,87	0,88	1,01	0,81	0,90	0,59	0,83	0,79	0,82	0,77
Ti	0,04	0,04	0,04	0,03	0,06	0,06	0,02	0,04	0,03	0,02	0,01
Cr	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,02	0,01
Fe3+	0,85	0,69	0,53	0,48	0,82	0,52	0,96	0,66	0,90	0,83	0,80
Fe2+	0,24	0,38	0,51	0,62	0,38	0,55	0,02	0,49	0,31	0,30	0,35
Mn	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02
Mg	3,05	2,97	2,98	2,83	2,92	2,96	3,37	2,93	2,94	2,94	3,04
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
Ca	1,58	1,61	1,71	1,76	1,60	1,72	1,56	1,67	1,66	1,60	1,62
Na	0,52	0,55	0,45	0,43	0,49	0,46	0,41	0,50	0,48	0,55	0,53
K	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
OH*	2,00	1,99	1,99	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99	2,00	2,00
Calculation scheme	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13
(Ca+Na) (B)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,97	2,00	2,00	2,00	2,00
Na (B)	0,42	0,39	0,29	0,24	0,40	0,28	0,41	0,33	0,34	0,40	0,38
(Na+K) (A)	0,13	0,21	0,19	0,24	0,12	0,21	0,03	0,20	0,18	0,19	0,18
Mg/(Mg+Fe2)	0,93	0,89	0,85	0,82	0,89	0,84	0,99	0,86	0,90	0,91	0,90
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,53	0,44	0,38	0,32	0,50	0,37	0,62	0,44	0,53	0,50	0,51
Classification	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	tschermakitic hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	tschermakitic hornblende	tschermakitic hornblende	magnesio-hornblende

Cont. Microprobe data for Ca-Amphibole

Sample No.	Amphibolite											
	MNS10 5	MNS13 1	MNS13 2	MNS13 3	MNS13 4	MNS13 5	MNS13 6	MNS13 7	MNS13 8	MNS13 9	MNS15 2	MNS15 3
SiO ₂	47,58	53,07	49,31	45,93	47,82	46,92	47,68	54,16	47,30	54,93	45,69	45,98
TiO ₂	0,27	0,45	0,59	0,97	0,83	1,27	0,96	0,04	0,92	0,00	1,67	1,53
Al ₂ O ₃	11,84	3,74	7,37	10,75	9,30	9,51	9,36	3,22	9,60	2,43	10,61	10,73
Cr ₂ O ₃	0,13	0,15	0,07	0,00	0,00	0,05	0,00	0,02	0,17	0,01	0,00	0,14
FeO	10,08	9,16	10,80	9,79	9,48	9,79	9,28	8,77	10,15	11,11	11,39	9,41
MnO	0,22	0,30	0,26	0,23	0,20	0,20	0,31	0,21	0,19	0,48	0,24	0,17
MgO	15,23	17,83	14,69	14,10	14,63	14,48	14,66	18,23	14,41	19,40	12,87	14,39
CaO	10,77	12,23	12,21	12,07	12,04	12,01	11,97	11,88	11,73	8,81	11,79	11,94
Na ₂ O	1,57	0,47	0,86	1,17	1,07	1,07	1,05	0,41	0,96	0,28	1,53	1,49
K ₂ O	0,21	0,18	0,31	0,71	0,57	0,60	0,55	0,12	0,53	0,04	0,81	0,75
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,05	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,02
NiO	0,07	0,17	0,08	0,18	0,23	0,07	0,08	0,11	0,03	0,13	0,08	0,16
V ₂ O ₃	0,07	0,01	0,06	0,26	0,24	0,21	0,16	0,06	0,09	0,00	0,07	0,11
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
H ₂ O*	2,15	2,13	2,07	2,05	2,06	2,04	2,05	2,14	2,06	2,18	2,04	2,06
O=F,Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	101,09	100,37	98,82	98,18	98,40	98,24	98,14	99,87	98,43	101,04	98,76	98,92
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+												
Si	6,64	7,45	7,15	6,72	6,95	6,84	6,94	7,59	6,86	7,55	6,72	6,68
Al iv	1,36	0,55	0,85	1,28	1,05	1,16	1,06	0,41	1,14	0,39	1,28	1,32
Al vi	0,58	0,07	0,40	0,57	0,54	0,48	0,54	0,12	0,50	0,00	0,56	0,52
Ti	0,03	0,05	0,06	0,11	0,09	0,14	0,10	0,00	0,10	0,00	0,18	0,17
Cr	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02
Fe3+	1,03	0,52	0,23	0,25	0,18	0,22	0,19	0,58	0,40	1,28	0,05	0,17
Fe2+	0,14	0,55	1,08	0,94	0,97	0,97	0,94	0,45	0,84	0,00	1,35	0,97
Mn	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,06	0,03	0,02
Mg	3,17	3,73	3,17	3,07	3,17	3,15	3,18	3,81	3,12	3,98	2,82	3,12
Ni	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
Ca	1,61	1,84	1,90	1,89	1,87	1,88	1,87	1,78	1,82	1,30	1,86	1,86
Na	0,42	0,13	0,24	0,33	0,30	0,30	0,30	0,11	0,27	0,07	0,44	0,42
K	0,04	0,03	0,06	0,13	0,11	0,11	0,10	0,02	0,10	0,01	0,15	0,14
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OH*	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99	1,99	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Calculation scheme	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13
(Ca+Na) (B)	2,00	1,97	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,90	2,00	1,37	2,00	2,00
Na (B)	0,39	0,13	0,10	0,11	0,13	0,12	0,13	0,11	0,18	0,07	0,14	0,14
(Na+K) (A)	0,07	0,03	0,19	0,35	0,28	0,29	0,26	0,02	0,19	0,01	0,45	0,42
Mg/(Mg+Fe2)	0,96	0,87	0,75	0,77	0,77	0,76	0,77	0,90	0,79	1,00	0,68	0,76
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,64	0,88	0,36	0,31	0,25	0,32	0,26	0,83	0,44	1,00	0,09	0,25
Classification	magnesio-hornblende	actinolitic hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	actinolite	magnesio-hornblende	tremolite	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende

Cont. Microprobe data for Ca-Amphibole

Sample No.	Amphibolite											
	MNS17 2	MNS17 3	MNS21 1	MNS23 1	MNS24 1	MNS25 2	MNS25 3	MNS25 5	MNN10 2	MNN10 3	MNN10 4	MNN13 1
SiO ₂	44,48	45,22	49,18	44,76	49,33	47,40	47,59	46,80	48,56	49,87	49,29	51,35
TiO ₂	0,16	0,38	0,40	0,29	0,19	0,37	0,30	0,53	0,81	0,46	0,33	0,72
Al ₂ O ₃	16,42	15,72	8,67	12,68	8,36	12,25	11,91	12,49	7,97	7,21	7,63	4,85
Cr ₂ O ₃	0,03	0,00	0,07	0,08	0,25	0,14	0,07	0,29	0,01	0,18	0,14	0,03
FeO	7,66	7,62	6,14	10,21	5,87	8,62	8,97	8,02	10,30	9,22	10,21	11,23
MnO	0,13	0,17	0,17	0,25	0,22	0,13	0,10	0,11	0,32	0,20	0,23	0,28
MgO	13,96	13,86	18,80	14,36	18,59	14,99	15,30	14,98	15,06	15,84	14,46	15,73
CaO	11,09	11,42	12,09	11,51	12,14	10,74	10,93	10,96	12,13	12,30	12,79	11,61
Na ₂ O	1,82	1,90	1,88	1,95	1,33	1,77	1,73	1,80	1,10	0,98	0,90	0,91
K ₂ O	0,24	0,24	0,19	0,28	0,16	0,19	0,18	0,18	0,26	0,18	0,16	0,22
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,01	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
NiO	0,10	0,09	0,04	0,17	0,06	0,06	0,01	0,11	0,09	0,14	0,14	0,20
V ₂ O ₃	0,00	0,08	0,01	0,05	0,04	0,05	0,00	0,05	0,04	0,02	0,10	0,08
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
H ₂ O*	2,10	2,10	2,15	2,08	2,13	2,12	2,13	2,11	2,07	2,09	2,06	2,09
O=F,Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	98,78	99,07	100,33	99,32	99,22	99,43	99,93	98,91	99,00	98,86	98,33	99,67
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+												
Si	6,33	6,44	6,87	6,44	6,94	6,70	6,70	6,66	7,01	7,17	7,18	7,35
Al iv	1,67	1,56	1,13	1,56	1,06	1,30	1,30	1,34	0,99	0,83	0,82	0,65
Al vi	1,08	1,08	0,29	0,60	0,33	0,75	0,68	0,75	0,37	0,39	0,49	0,16
Ti	0,02	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,06	0,09	0,05	0,04	0,08
Cr	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,00	0,02	0,02	0,00
Fe3+	0,63	0,35	0,58	0,74	0,61	0,68	0,74	0,57	0,32	0,23	0,00	0,48
Fe2+	0,29	0,56	0,13	0,49	0,08	0,34	0,31	0,38	0,92	0,88	1,24	0,87
Mn	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,03	0,03
Mg	2,96	2,94	3,91	3,08	3,90	3,16	3,21	3,18	3,24	3,39	3,14	3,35
Ni	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ca	1,69	1,74	1,81	1,78	1,83	1,63	1,65	1,67	1,88	1,89	2,00	1,78
Na	0,50	0,52	0,51	0,55	0,36	0,49	0,47	0,50	0,31	0,27	0,25	0,25
K	0,04	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OH*	2,00	1,99	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Calculation scheme	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13	∑13
(Ca+Na) (B)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Na (B)	0,31	0,26	0,19	0,22	0,17	0,37	0,35	0,33	0,12	0,11	0,00	0,22
(Na+K) (A)	0,24	0,31	0,35	0,37	0,22	0,15	0,15	0,20	0,23	0,20	0,28	0,07
Mg/(Mg+Fe2)	0,91	0,84	0,97	0,86	0,98	0,90	0,91	0,89	0,78	0,79	0,72	0,79
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,37	0,25	0,66	0,55	0,65	0,48	0,52	0,43	0,47	0,37	0,00	0,74
									0,72	0,75	0,72	0,71
Classification	tschermakitic hornblende	tschermakitic hornblende	magnesio- hornblende	tschermakitic hornblende	magnesio- hornblende	magnesio- hornblende	magnesio- hornblende	magnesio- hornblende	magnesio- hornblende	magnesio- hornblende	magnesio- hornblende	actinolitic hornblende

Cont. Microprobe data for Ca-Amphibole

Sample No.	Amphibolite		
	MNN13 2	MNN15 1	MNN15 2
SiO ₂	49,13	46,63	47,29
TiO ₂	0,66	0,65	0,71
Al ₂ O ₃	6,40	12,71	12,25
Cr ₂ O ₃	0,11	0,15	0,06
FeO	12,42	8,97	9,17
MnO	0,25	0,19	0,12
MgO	14,29	15,03	15,21
CaO	11,25	10,70	10,89
Na ₂ O	1,29	1,58	1,48
K ₂ O	0,32	0,21	0,20
F	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00
NiO	0,10	0,03	0,03
V ₂ O ₃	0,10	0,04	0,07
P ₂ O ₅	na	na	na
H ₂ O*	2,06	2,13	2,14
O=F,Cl	0,00	0,00	0,00
Total	98,74	99,83	100,35
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+			
Si	7,16	6,57	6,63
Al iv	0,84	1,43	1,37
Al vi	0,25	0,68	0,65
Ti	0,07	0,07	0,07
Cr	0,01	0,02	0,01
Fe3+	0,50	0,91	0,86
Fe2+	1,02	0,15	0,21
Mn	0,03	0,02	0,01
Mg	3,10	3,16	3,18
Ni	0,01	0,00	0,00
Ca	1,76	1,61	1,63
Na	0,36	0,43	0,40
K	0,06	0,04	0,04
F	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00
OH*	2,00	2,00	2,00
Calculation scheme	∑13	∑13	∑13
(Ca+Na) (B)	2,00	2,00	2,00
Na (B)	0,24	0,39	0,37
(Na+K) (A)	0,18	0,08	0,07
Mg/(Mg+Fe2)	0,75	0,95	0,94
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,66	0,57	0,57
	0,67	0,75	0,75
Classification	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende	magnesio-hornblende

Cont. Micropobe data for (Mg-Fe) amphibole

Sample No.	Amphibolite				
	MNN15 4	MNN15 5	MNN15 3	MNN15 4	MNN15 5
SiO ₂	52,62	54,81	55,10	52,62	54,81
TiO ₂	0,17	0,21	0,06	0,17	0,21
Al ₂ O ₃	5,49	3,26	3,27	5,49	3,26
Cr ₂ O ₃	0,10	0,03	0,02	0,10	0,03
FeO	14,37	14,18	14,92	14,37	14,18
MnO	0,40	0,39	0,30	0,40	0,39
MgO	21,93	23,11	22,76	21,93	23,11
CaO	0,65	0,51	0,50	0,65	0,51
Na ₂ O	0,50	0,25	0,27	0,50	0,25
K ₂ O	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
NiO	0,08	0,04	0,00	0,08	0,04
V ₂ O ₃	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03
H ₂ O*	2,11	2,13	2,13	2,11	2,13
O=F,Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	98,44	98,93	99,34	98,44	98,93
Number of cations per 23 oxygens for maximum Fe3+					
Si	7,49	7,72	7,75	7,49	7,72
Al iv	0,51	0,28	0,25	0,51	0,28
Al vi	0,41	0,27	0,29	0,41	0,27
Ti	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
Cr	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
Fe3+	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe2+	1,71	1,67	1,75	1,71	1,67
Mn	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
Mg	4,65	4,86	4,77	4,65	4,86
Ni	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
Ca	0,10	0,08	0,08	0,10	0,08
Na	0,14	0,07	0,07	0,14	0,07
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OH*	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Calculation scheme	∑15	∑15	∑15	∑15	∑15
Amphibole group	Fe-Mg-Mn	Fe-Mg-Mn	Fe-Mg-Mn	Fe-Mg-Mn	Fe-Mg-Mn
(Ca+Na) (B)	0,15	0,13	0,14	0,15	0,13
Na (B)	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06
(Na+K) (A)	0,09	0,01	0,01	0,09	0,01
Mg/(Mg+Fe2)	0,73	0,74	0,73	0,73	0,74
Fe3/(Fe3+Alvi)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	14,86	14,87	14,86	14,86	
Classification	anthophyllite	anthophyllite	anthophyllite	anthophyllite	anthophyllite

Microprobe data for clinopyroxene

Rock																
Sample	MNN12	MNN12	MNN12	MNN12	MNN12	MNN12	MNN12	MNN14	MNN14	MNN14	MNN14	MNN14	MNN14	MNN16	MNN16	
No.	1	2	3	8	9	10	11	3	7	9	10	14	19	1	2	
SiO ₂	52,81	52,68	52,51	50,79	48,27	52,10	52,08	52,20	52,06	49,89	52,92	50,12	50,88	44,33	43,86	
TiO ₂	0,26	0,13	0,22	0,19	0,97	0,11	0,14	1,89	0,36	3,15	0,29	2,51	0,84	0,14	0,83	
Al ₂ O ₃	2,31	1,83	1,74	2,22	9,61	2,01	1,84	1,05	4,51	2,45	2,76	3,40	3,83	16,51	16,34	
Cr ₂ O ₃	0,05	0,01	0,04	0,10	0,13	0,08	0,00	0,14	0,30	0,28	0,41	0,29	0,40	0,00	0,15	
FeO	7,95	7,15	6,51	7,27	11,57	6,78	6,62	6,68	6,73	12,64	5,95	8,84	8,19	10,24	10,80	
MnO	0,20	0,39	0,31	0,40	0,21	0,13	0,25	0,15	0,28	0,33	0,17	0,12	0,12	0,25	0,15	
MgO	14,25	14,66	14,37	14,02	14,44	14,01	14,37	15,61	14,64	17,06	14,97	15,02	14,97	13,04	12,90	
CaO	22,10	22,38	23,46	23,24	11,58	23,01	22,81	22,44	20,78	13,49	21,82	18,66	19,09	10,95	10,96	
Na ₂ O	0,53	0,48	0,47	0,46	1,41	0,48	0,45	0,39	0,62	0,41	0,48	0,44	0,54	2,01	1,87	
K ₂ O	0,03	0,00	0,02	0,03	0,46	0,00	0,05	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,49	0,55	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,04	
NiO	0,07	0,03	0,00	0,06	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	
V ₂ O ₃	0,04	0,05	0,03	0,07	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04	0,16	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	
Total	100,59	99,80	99,66	98,85	98,84	98,80	98,66	100,61	100,33	99,91	99,86	99,45	98,91	98,07	98,49	
Number of cations per 6 oxygens																
Si	1,95	1,95	1,95	1,90	1,80	1,95	1,95	1,92	1,91	1,87	1,95	1,87	1,90	1,64	1,62	
Ti	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00	0,05	0,01	0,09	0,01	0,07	0,02	0,00	0,02	
Al	0,10	0,08	0,08	0,10	0,42	0,09	0,08	0,05	0,20	0,11	0,12	0,15	0,17	0,72	0,71	
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	
Fe3+	0,03	0,04	0,05	0,12	0,05	0,04	0,05	0,03	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,01	0,17	0,16	
Fe2+	0,21	0,18	0,15	0,11	0,31	0,17	0,16	0,17	0,20	0,39	0,20	0,29	0,24	0,15	0,17	
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	
Mg	0,78	0,81	0,79	0,78	0,80	0,78	0,80	0,86	0,80	0,95	0,82	0,84	0,83	0,72	0,71	
Ca	0,87	0,89	0,93	0,93	0,46	0,92	0,91	0,88	0,82	0,54	0,86	0,75	0,76	0,43	0,43	
Na	0,04	0,03	0,03	0,03	0,10	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,14	0,13	
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	
Mg/(Mg+Fe2)	0,79	0,82	0,84	0,88	0,72	0,82	0,84	0,83	0,80	0,71	0,81	0,74	0,77	0,83	0,80	
Fe2/(Fetot)	0,87	0,80	0,73	0,49	0,85	0,82	0,76	0,83	0,98	0,99	1,08	1,05	0,95	0,47	0,52	
Al/(Al+Fe3+Cr)	0,75	0,64	0,58	0,45	0,88	0,69	0,62	0,54	0,94	0,91	1,02	1,04	0,87	0,81	0,81	
Tri. plots																
En	0,42	0,43	0,42	0,43	0,51	0,42	0,43	0,45	0,44	0,50	0,44	0,45	0,45	0,55	0,54	
Fs	0,11	0,09	0,08	0,06	0,20	0,09	0,08	0,09	0,11	0,21	0,11	0,16	0,13	0,11	0,13	
Wo	0,47	0,47	0,50	0,51	0,29	0,49	0,49	0,46	0,45	0,29	0,46	0,40	0,42	0,33	0,33	
Classification	diopside	diopside	diopside	diopside	augite	diopside	diopside	diopside	augite	augite	diopside	augite	augite	augite	augite	

Cont. Microprobe data for clinopyroxene

Sample	Norite															
	MNN16	MNN16	MNN16	MNN16	MNN16	MNN16	MNN16	MNN16	MNN16	MNN16	MNS07	MNS09	MNS11	MNS11	MNS11	
No.	3	4	5	6	7	8	9	10	11	21	2	1	1	21	2	
SiO ₂	48,33	49,36	48,21	51,20	53,13	53,18	51,84	52,89	53,42	53,53	53,27	52,57	53,54	47,91	52,11	
TiO ₂	1,07	0,15	0,83	0,35	0,68	0,35	0,28	0,29	0,23	0,07	0,39	0,35	0,04	6,17	0,34	
Al ₂ O ₃	12,81	10,74	10,05	7,34	5,71	4,80	4,64	4,54	3,31	2,37	3,08	4,33	2,53	1,76	3,70	
Cr ₂ O ₃	0,29	0,25	0,27	0,68	0,10	0,77	0,35	0,44	0,44	0,64	0,19	0,42	0,34	0,06	0,37	
FeO	9,73	9,59	10,45	9,45	8,61	8,70	7,40	7,95	7,35	6,49	5,73	6,11	5,33	10,85	5,58	
MnO	0,23	0,18	0,25	0,05	0,10	0,14	0,12	0,29	0,13	0,21	0,16	0,07	0,17	0,15	0,05	
MgO	14,49	15,41	14,42	16,01	17,65	17,32	14,65	15,09	14,71	14,98	15,76	16,48	15,81	13,52	15,65	
CaO	10,28	11,56	12,18	12,55	11,69	12,05	19,24	18,53	19,88	20,93	21,43	18,18	22,79	19,86	22,31	
Na ₂ O	1,53	1,10	1,03	0,74	0,65	0,66	0,65	0,63	0,69	0,51	0,41	0,47	0,33	0,31	0,41	
K ₂ O	0,72	0,32	0,28	0,21	0,16	0,07	0,16	0,08	0,06	0,05	0,07	0,09	0,05	0,00	0,01	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,04	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	
NiO	0,05	0,12	0,00	0,05	0,04	0,00	0,00	0,06	0,04	0,03	0,05	0,08	0,04	0,08	0,05	
V ₂ O ₃	0,06	0,00	0,05	0,10	0,00	0,07	0,08	0,13	0,04	0,02	0,05	0,06	0,10	0,08	0,00	
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	0,04	na	
Total	99,61	98,77	98,04	98,72	98,53	98,11	99,43	100,93	100,29	99,83	100,59	99,21	101,08	100,79	100,57	
Number of cations per 6 oxygens																
Si	1,77	1,82	1,81	1,90	1,97	1,98	1,92	1,93	1,97	1,98	1,94	1,94	1,94	1,81	1,90	
Ti	0,03	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,18	0,01	
Al	0,55	0,47	0,44	0,32	0,25	0,21	0,20	0,20	0,14	0,10	0,13	0,19	0,11	0,08	0,16	
Cr	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	
Fe3+	-0,02	-0,03	-0,02	-0,10	-0,17	-0,17	-0,01	-0,04	-0,05	-0,04	-0,02	-0,06	0,02	-0,03	0,04	
Fe2+	0,31	0,33	0,35	0,40	0,44	0,44	0,24	0,29	0,27	0,24	0,19	0,25	0,15	0,37	0,13	
Mn	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
Mg	0,79	0,85	0,81	0,89	0,97	0,96	0,81	0,82	0,81	0,82	0,86	0,91	0,86	0,76	0,85	
Ca	0,40	0,46	0,49	0,50	0,46	0,48	0,76	0,73	0,78	0,83	0,84	0,72	0,89	0,80	0,87	
Na	0,11	0,08	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	
K	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Mg/(Mg+Fe2)	0,72	0,72	0,70	0,69	0,69	0,69	0,77	0,74	0,75	0,77	0,82	0,79	0,85	0,67	0,87	
Fe2/(Fetot)	1,05	1,11	1,07	1,36	1,64	1,63	1,06	1,18	1,22	1,21	1,09	1,31	0,90	1,08	0,75	
Al/(Al+Fe3+Cr)	1,01	1,06	1,03	1,36	3,02	3,38	1,02	1,19	1,34	1,28	1,09	1,32	0,81	1,48	0,75	
Tri. plots																
En	0,52	0,52	0,49	0,50	0,52	0,51	0,45	0,45	0,43	0,44	0,45	0,48	0,45	0,39	0,46	
Fs	0,21	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23	0,13	0,16	0,15	0,13	0,10	0,13	0,08	0,19	0,07	
Wo	0,27	0,28	0,30	0,28	0,25	0,26	0,42	0,40	0,42	0,44	0,44	0,38	0,47	0,42	0,47	
Classification	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	augite	diopside	augite	diopside

Cont. Microprobe data for clinopyroxene

Sample No.	Clinopyroxene										Feldspathic Peridotite					
	MNS11 13	MNS11 14	MNS11 17	MNS11 15	MNS11 12	MNS13 4	MNS13 5	MNS13 6	MNS13 7	MNS13 8	MNS14 4	MNS14 1	MNS14 8	MNS14 2	MNS14 3	MNS14 5
SiO ₂	53,26	54,25	50,01	53,38	52,51	52,72	53,46	52,25	51,87	52,56	52,13	50,59	53,29	50,36	50,57	51,25
TiO ₂	0,35	0,23	4,26	0,30	0,41	0,10	0,21	0,19	0,40	0,15	0,60	1,21	0,31	1,22	1,45	1,37
Al ₂ O ₃	3,82	3,51	2,34	2,92	4,28	1,78	1,63	2,70	3,52	3,73	3,80	5,38	3,48	4,95	5,39	4,91
Cr ₂ O ₃	0,38	0,43	0,22	0,19	0,37	0,00	0,11	0,00	0,12	0,00	0,98	0,82	0,59	0,78	0,33	0,29
FeO	6,86	6,73	8,96	6,24	7,47	6,06	6,11	7,26	8,24	7,67	4,69	4,20	7,10	4,35	4,14	4,22
MnO	0,31	0,15	0,15	0,18	0,26	0,36	0,15	0,22	0,10	0,09	0,12	0,09	0,19	0,09	0,08	0,12
MgO	14,96	15,95	14,62	14,81	14,65	14,52	15,14	14,23	14,47	15,63	15,93	14,22	19,13	15,10	14,69	15,28
CaO	19,39	18,11	18,58	20,63	18,25	22,77	22,60	21,15	20,02	18,25	21,59	22,75	15,36	22,24	22,15	21,39
Na ₂ O	0,54	0,44	0,41	0,44	0,49	0,43	0,49	0,57	0,56	0,58	0,53	0,66	0,45	0,54	0,67	0,58
K ₂ O	0,08	0,03	0,00	0,01	0,06	0,02	0,05	0,11	0,08	0,14	0,01	0,05	0,00	0,02	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00
NiO	0,01	0,05	0,03	0,05	0,06	0,08	0,01	0,01	0,05	0,02	0,02	0,05	0,01	0,01	0,08	0,02
V ₂ O ₃	0,03	0,05	0,08	0,03	0,05	0,00	0,04	0,02	0,05	0,05	0,08	0,10	0,04	0,08	0,07	0,08
P ₂ O ₅	0,07	0,08	0,07	0,00	0,00	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Total	100,05	100,00	99,73	99,18	98,84	98,84	100,01	98,76	99,49	98,87	100,49	100,11	99,96	99,75	99,63	99,50
Number of cations per 6 oxygens																
Si	1,96	2,00	1,88	1,98	1,96	1,97	1,97	1,95	1,93	1,95	1,90	1,86	1,94	1,85	1,86	1,89
Ti	0,01	0,01	0,12	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,01	0,03	0,04	0,04
Al	0,17	0,15	0,10	0,13	0,19	0,08	0,07	0,12	0,15	0,16	0,16	0,23	0,15	0,21	0,23	0,21
Cr	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Fe3+	-0,08	-0,14	-0,09	-0,09	-0,11	0,01	0,02	0,01	0,01	-0,03	0,01	0,01	-0,03	0,03	0,00	-0,03
Fe2+	0,29	0,34	0,37	0,28	0,34	0,18	0,17	0,22	0,25	0,27	0,13	0,12	0,24	0,10	0,12	0,16
Mn	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Mg	0,82	0,87	0,82	0,82	0,82	0,81	0,83	0,79	0,80	0,87	0,87	0,78	1,04	0,83	0,81	0,84
Ca	0,77	0,71	0,75	0,82	0,73	0,91	0,89	0,85	0,80	0,73	0,84	0,89	0,60	0,88	0,87	0,84
Na	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg/(Mg+Fe2)	0,74	0,72	0,69	0,75	0,70	0,82	0,83	0,78	0,76	0,77	0,87	0,87	0,81	0,89	0,87	0,84
Fe2/(Fetot)	1,38	1,65	1,31	1,45	1,47	0,93	0,91	0,96	0,97	1,11	0,90	0,90	1,12	0,75	0,98	1,21
Al/(Al+Fe3+Cr)	1,71	5,26	4,41	2,72	2,08	0,86	0,78	0,93	0,93	1,20	0,79	0,86	1,06	0,79	0,95	1,09
Tri. plots																
En	0,44	0,45	0,42	0,43	0,43	0,43	0,44	0,43	0,43	0,47	0,47	0,43	0,55	0,46	0,45	0,46
Fs	0,15	0,18	0,19	0,15	0,18	0,09	0,09	0,12	0,13	0,14	0,07	0,06	0,13	0,06	0,07	0,09
Wo	0,41	0,37	0,39	0,43	0,39	0,48	0,47	0,46	0,43	0,39	0,46	0,50	0,32	0,49	0,48	0,46
Classification	augite	augite	augite	augite	augite	diopside	diopside	diopside	augite	augite	diopside	diopside	augite	diopside	diopside	diopside

Microprobe data for Kyanite

Rock	Amphibolite											
Sample	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNN19	MNN19	MNN19	MNN19
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4
SiO ₂	37,86	37,41	37,52	37,76	37,52	37,54	37,45	37,41	37,59	36,68	37,79	37,12
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,17	0,00	0,07	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	62,88	62,69	62,07	62,46	62,31	61,64	62,13	62,24	61,57	60,94	62,49	60,89
Cr ₂ O ₃	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,03	0,00	0,02
FeO	0,34	0,42	0,43	0,46	0,33	0,52	0,51	0,56	0,59	0,63	0,46	0,88
MnO	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,08	0,03	0,01
MgO	0,00	0,01	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,02	0,02	0,06	0,01	0,38
CaO	0,03	0,00	0,00	0,04	0,03	0,02	0,00	0,02	0,02	0,06	0,00	0,05
Na ₂ O	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02
K ₂ O	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,03	0,00	0,03	0,01	0,00	0,03
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
NiO	0,00	0,03	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,07
V ₂ O ₃	0,00	0,02	0,02	0,05	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00
Total	101,13	100,62	100,06	100,81	100,34	99,83	100,18	100,51	99,91	98,56	100,82	99,48

Microprobe data for garnet

Rock Sample No.	Calcsilicate		
	MNS3A 1	MNS3A 2	MNS3A 3
SiO ₂	38,46	36,23	38,11
TiO ₂	0,00	0,13	0,00
Al ₂ O ₃	20,77	20,60	20,84
Cr ₂ O ₃	0,09	0,02	0,03
FeO	27,28	29,17	28,00
MnO	2,28	2,15	2,10
MgO	5,70	6,12	6,08
CaO	4,22	3,68	3,96
Na ₂ O	0,00	0,01	0,00
K ₂ O	0,00	0,02	0,03
F	0,00	0,00	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00
NiO	0,03	0,02	0,03
V ₂ O ₃	0,02	0,03	0,06
P ₂ O ₅	0,00	0,02	0,00
Total	98,84	98,18	99,22
Number of cations per 12 oxygens			
Si	3,05	2,90	3,01
Ti	0,00	0,01	0,00
Al	1,94	1,94	1,94
Cr	0,01	0,00	0,00
Fe ³⁺	-0,06	0,24	0,03
Fe ²⁺	1,87	1,72	1,82
Mn	0,15	0,15	0,14
Mg	0,67	0,73	0,72
Ca	0,36	0,32	0,34
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0,27	0,30	0,28
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ +Fe ³⁺)	1,03	0,88	0,98
Al/(Al+Fe ³⁺ +Cr)	1,03	0,89	0,98
End-members			
Almandine	61,15	59,03	60,44
Spessartine	5,01	5,01	4,66
Pyrope	22,10	25,10	23,78
Grossular	12,06	9,68	10,94
Andradite	-0,35	1,18	0,17
Uvarovite	0,03	0,01	0,01

Microprobe data for feldspar

Rock Sample No.	Norite											
	MNS07 1	MNS07 2	MNS07 3	MNS07 4	MNS07 5	MNS09 1	MNS11 1	MNS11 2	MNS11 3	MNS11 4	MNS11 5	MNS11 6
SiO ₂	53,864	59,852	50,127	48,39	52,368	52,962	47,569	50,796	51,206	47,244	47,058	52,88
TiO ₂	0,009	0,01	0,218	0,05	0,123	0,108	0	0,04	0,267	0,035	0	0,035
Al ₂ O ₃	28,863	24,636	30,735	32,483	29,604	28,716	32,806	30,284	30,045	32,947	33,835	30,257
Cr ₂ O ₃	0,033	0	0	0,022	0,083	0	0,094	0,037	0,215	0	0	0,129
FeO	0,033	0,096	0,119	0,048	0,13	0,099	0,067	0,289	0,056	0,085	0,089	0
MnO	0,01	0,034	0	0	0,019	0,07	0,067	0,04	0,058	0,042	0,06	0,026
MgO	0	0,02	0,079	0	0	0,005	0,016	0	0,007	0,005	0	0,019
CaO	11,649	6,917	14,24	16,216	12,785	12,008	16,128	13,17	12,962	16,013	16,564	12,331
Na ₂ O	5,399	8,109	3,568	2,379	4,312	4,611	1,831	3,559	3,756	1,707	1,627	4,095
K ₂ O	0,088	0,07	0,032	0,044	0,065	0,096	0,026	0,075	0,114	0,054	0,037	0,085
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0,015	0	0,008	0	0,001	0,012	0,004	0,013	0,003	0,011	0	0,012
NiO	0	0,011	0	0	0,054	0,011	0,079	0,088	0	0	0	0,037
V ₂ O ₃	0	0	0,027	0	0	0,002	0,01	0,019	0	0,025	0,018	0,015
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	0,062	0	0,059	0,038	0	0,049
Total	99,96	99,755	99,151	99,632	99,544	98,697	98,758	98,407	98,747	98,204	99,288	99,967
Number of cations per 8 oxygens												
Si	2,440	2,679	2,306	2,224	2,390	2,429	2,208	2,348	2,359	2,201	2,171	2,396
Al	1,541	1,300	1,667	1,760	1,592	1,553	1,795	1,650	1,632	1,809	1,840	1,616
Ti	0,000	0,000	0,008	0,002	0,004	0,004	0,000	0,001	0,009	0,001	0,000	0,001
Fe	0,001	0,004	0,005	0,002	0,005	0,004	0,003	0,011	0,002	0,003	0,003	0,000
Mn	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
Mg	0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Ca	0,565	0,332	0,702	0,799	0,625	0,590	0,802	0,652	0,640	0,799	0,819	0,599
Na	0,474	0,704	0,318	0,212	0,382	0,410	0,165	0,319	0,336	0,154	0,146	0,360
K	0,005	0,004	0,002	0,003	0,004	0,006	0,002	0,004	0,007	0,003	0,002	0,005
Or	0,487	0,384	0,184	0,255	0,374	0,558	0,159	0,453	0,682	0,335	0,225	0,510
Ab	45,392	67,702	31,139	20,925	37,759	40,770	17,016	32,693	34,165	16,117	15,058	37,346
An	54,121	31,913	68,677	78,820	61,867	58,672	82,825	66,854	65,153	83,548	84,716	62,144
Name	Labradorita	Andesina	Labradorita	Bytownita	Labradorita	Labradorita	Bytownita	Labradorita	Labradorita	Bytownita	Bytownita	Labradorita

Microprobe data for feldspar

Norite

Sample No.	MNS11 7	MNS11 8	MNS11 9	MNS11 10	MNS11 11	MNS11 12	MNS11 13	MNS11 14	MNS12 1	MNS12 2	MNS12 3	MNS12 4
SiO ₂	52,609	52,497	52,462	53,553	52,725	52,107	51,944	53,123	58,792	58,974	60,011	59,146
TiO ₂	0,054	0,094	0,078	0,129	0,024	0,019	0,073	0,019	0,038	0,074	0,04	0,064
Al ₂ O ₃	30,033	29,702	29,307	29,881	29,665	29,419	29,37	28,965	26,077	25,186	23,879	24,526
Cr ₂ O ₃	0,048	0,201	0	0	0,012	0,073	0,119	0	0,07	0	0,003	0,119
FeO	0,078	0,038	0,118	0,123	0,164	0,154	0,407	0,053	0,051	0,012	0	0,021
MnO	0	0,05	0,115	0	0	0,059	0,042	0,019	0	0,005	0	0,061
MgO	0,016	0,007	0	0,017	0,005	0,012	0,022	0	0,034	0	0,03	0
CaO	12,229	12,31	12,092	12,08	12,156	12,269	12,47	12,63	8,608	7,47	6,482	7,237
Na ₂ O	4,026	3,912	4,117	4,504	3,949	4,204	3,788	4,362	7,026	7,57	7,958	7,705
K ₂ O	0,102	0,071	0,136	0,089	0,268	0,078	0,108	0,123	0,014	0,072	0,115	0,059
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0,003	0	0,033	0	0,017	0,022	0	0	0,005	0,036	0	0
NiO	0	0,009	0,015	0	0,003	0	0,043	0	0,004	0	0	0
V ₂ O ₃	0,027	0	0,065	0,019	0,015	0	0,033	0	0,015	0,018	0	0
P ₂ O ₅	0,049	0,023	0,026	0	0	0,065	0,016	na	na	na	na	na
Total	99,273	98,914	98,557	100,395	98,999	98,476	98,435	99,294	100,733	99,409	98,518	98,938

Number of cations per 8 oxygens

Si	2,397	2,403	2,411	2,412	2,409	2,400	2,396	2,423	2,615	2,651	2,711	2,672
Al	1,613	1,603	1,587	1,586	1,597	1,597	1,597	1,557	1,367	1,334	1,272	1,306
Ti	0,002	0,003	0,003	0,004	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,003	0,001	0,002
Fe	0,003	0,001	0,005	0,005	0,006	0,006	0,016	0,002	0,002	0,000	0,000	0,001
Mn	0,000	0,002	0,004	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002
Mg	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,002	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000
Ca	0,597	0,604	0,595	0,583	0,595	0,605	0,616	0,617	0,410	0,360	0,314	0,350
Na	0,356	0,347	0,367	0,393	0,350	0,375	0,339	0,386	0,606	0,660	0,697	0,675
K	0,006	0,004	0,008	0,005	0,016	0,005	0,006	0,007	0,001	0,004	0,007	0,003
Or	0,618	0,434	0,822	0,521	1,626	0,465	0,661	0,708	0,078	0,403	0,651	0,331
Ab	37,103	36,353	37,810	40,078	36,421	38,096	35,237	38,188	59,583	64,451	68,511	65,614
An	62,279	63,213	61,368	59,401	61,953	61,439	64,102	61,103	40,339	35,145	30,838	34,056

Name	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Andesina	Andesina	Andesina	Andesina
------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	----------	----------	----------	----------

Microprobe data for feldspar

Norite

Sample No.	MNS26 3	MNS26 4	MNS26 5	MNN12 1	MNN12 2	MNN12 3	MNN14 1	MNN14 2	MNN14 3	MNN16 1	MNN16 2	MNN16 3
SiO ₂	52,827	53,017	53,694	54,446	56,572	53,087	53,386	53,401	53,18	46,964	53,397	53,581
TiO ₂	0	0,217	0,064	0	0	0,113	0,177	0,26	0,069	0,064	0	0,064
Al ₂ O ₃	28,105	28,086	27,969	28,8	27,292	28,604	28,641	27,966	28,302	34,454	29,655	29,605
Cr ₂ O ₃	0,036	0,106	0,002	0	0	0	0,037	0,06	0,026	0	0	0,06
FeO	0,092	0	0,001	0,236	0,05	0,21	0,104	0,078	0,037	0,264	0,404	0,033
MnO	0	0,059	0,057	0,14	0	0	0,011	0,005	0	0	0,03	0,006
MgO	0,07	0,03	0	0,117	0	0,025	0	0,054	0,009	0	0	0,027
CaO	12,324	11,891	12,093	11,182	9,299	11,784	12,08	12,06	11,914	17,48	12,553	12,31
Na ₂ O	4,729	4,873	4,771	5,45	6,2	5,017	4,848	4,834	4,705	1,329	4,723	4,588
K ₂ O	0,036	0,091	0,075	0,32	0,152	0,184	0,101	0,103	0,077	0	0,065	0,097
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0,036	0,062	0,041	0	0	0,018	0	0,02	0,006	0,015	0	0,018
NiO	0	0	0	0	0,029	0	0	0	0	0,012	0	0
V ₂ O ₃	0,043	0	0,068	0,002	0	0,01	0	0	0	0,039	0	0
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Total	98,29	98,418	98,826	100,693	99,594	99,048	99,385	98,836	98,324	100,618	100,827	100,385

Number of cations per 8 oxygens

Si	2,438	2,443	2,460	2,45	2,55	2,43	2,43	2,45	2,45	2,14	2,40	2,42
Al	1,529	1,525	1,510	1,53	1,45	1,54	1,54	1,51	1,53	1,85	1,57	1,57
Ti	0,000	0,008	0,002	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,004	0,000	0,000	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00
Mn	0,000	0,002	0,002	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,005	0,002	0,000	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,609	0,587	0,594	0,54	0,45	0,58	0,59	0,59	0,59	0,86	0,61	0,59
Na	0,423	0,435	0,424	0,48	0,54	0,45	0,43	0,43	0,42	0,12	0,41	0,40
K	0,002	0,005	0,004	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Or	0,205	0,520	0,429	1,78	0,87	1,04	0,57	0,59	0,45	0,00	0,37	0,56
Ab	40,898	42,360	41,476	46,03	54,20	43,06	41,83	41,79	41,49	12,09	40,36	40,05
An	58,897	57,120	58,095	52,19	44,92	55,90	57,60	57,62	58,06	87,91	59,28	59,39

Name	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Labradorite	Andesine	Labradorite	Labradorite	Labradorite	Labradorite	Bytownite	Labradorite	Labradorite
------	-------------	-------------	-------------	-------------	----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-----------	-------------	-------------

Microprobe data for feldspar

Norite		Amphibolite											
Sample	MNN16	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS08	MNS10	MNS15	MNS17
No.	4	1	2	3	4	5	6	7	8	1	1	1	
SiO ₂	53,629	60,672	54,47	57,2	59,963	54,212	57,329	52,057	55,732	57,98	61,462	51,385	
TiO ₂	0,064	0	0	0,083	0	0,162	0,04	0	0,005	0	0	0	
Al ₂ O ₃	28,839	25,52	29,758	27,461	25,75	28,391	26,049	29,463	27,139	27,189	23,099	29,919	
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0,073	0,012	0	0,037	0	0,046	0	
FeO	0,05	0	0,016	0,038	0,024	0,003	0,056	0,037	0,05	0,047	0,037	0	
MnO	0	0,035	0	0	0	0	0	0,062	0,016	0	0	0,04	
MgO	0,012	0	0	0,008	0,001	0	0	0	0	0	0	0	
CaO	11,869	7,259	12,041	9,906	7,803	11,756	9,319	13,291	10,229	9,304	6,061	14,105	
Na ₂ O	4,957	7,678	4,825	6,046	7,085	5,094	6,459	4,22	5,77	6,568	8,438	3,75	
K ₂ O	0,085	0,043	0,002	0,058	0,034	0,046	0,067	0,02	0,053	0,043	0,08	0,025	
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cl	0	0	0	0,009	0	0	0,009	0	0	0	0,001	0	
NiO	0	0,037	0,006	0,006	0,03	0	0,025	0,043	0,011	0	0	0,029	
V ₂ O ₃	0,048	0,014	0	0	0,017	0,018	0,005	0,043	0	0	0,018	0,022	
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	
Total	99,553	101,258	101,118	100,813	100,707	99,755	99,368	99,236	99,042	101,131	99,242	99,275	
Number of cations per 8 oxygens													
Si	2,44	2,671	2,432	2,547	2,654	2,458	2,590	2,385	2,532	2,571	2,754	2,356	
Al	1,55	1,324	1,566	1,442	1,344	1,517	1,387	1,591	1,453	1,421	1,220	1,617	
Ti	0,00	0,000	0,000	0,003	0,000	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Fe	0,00	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000	
Mn	0,00	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,002	
Mg	0,00	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Ca	0,58	0,342	0,576	0,473	0,370	0,571	0,451	0,652	0,498	0,442	0,291	0,693	
Na	0,44	0,655	0,418	0,522	0,608	0,448	0,566	0,375	0,508	0,565	0,733	0,333	
K	0,00	0,002	0,000	0,003	0,002	0,003	0,004	0,001	0,003	0,002	0,005	0,001	
Or	0,48	0,241	0,011	0,330	0,196	0,260	0,378	0,114	0,304	0,241	0,444	0,142	
Ab	42,84	65,525	42,029	52,309	62,044	43,836	55,429	36,449	50,360	55,956	71,267	32,437	
An	56,68	34,233	57,960	47,361	37,760	55,904	44,193	63,437	49,335	43,803	28,288	67,421	
Name	Labradorite	Andesina	Labradorita	Andesina	Andesina	Labradorita	Andesina	Labradorita	Andesina	Andesina	Oligoclasio	Labradorita	

Microprobe data for feldspar

Amphibolite

Sample No.	MNS17 2	MNS22 1	MNS22 2	MNS22 3	MNS23 1	MNS23 2	MNS25 1	MNS25 2	MNN10 1	MNN10 2	MNN10 3	MNN15 1
SiO ₂	52,36	58,325	57,734	52,016	54,122	54,316	53,813	56,715	54,168	52,228	55,419	53,332
TiO ₂	0	0,083	0	0,137	0,019	0	0,196	0	0	0,108	0	0,03
Al ₂ O ₃	29,299	24,547	25,104	28,886	27,966	27,295	28,252	26,03	28,637	29,299	27,101	29,682
Cr ₂ O ₃	0,048	0	0,01	0	0,012	0	0	0,048	0	0	0	0,024
FeO	0,049	0,089	0,045	0	0,069	0,081	0,034	0	0,05	0,031	0	0,008
MnO	0,032	0,007	0,045	0,034	0,008	0,066	0	0	0	0,013	0	0,053
MgO	0	0,005	0,018	0,021	0,038	0	0,027	0	0	0,019	0	0
CaO	12,717	7,52	8,37	12,568	11,105	11,001	12,252	9,312	10,921	12,049	9,325	12,566
Na ₂ O	4,31	7,664	6,999	4,545	5,032	5,431	4,826	6,215	5,451	4,672	6,328	4,816
K ₂ O	0,038	0,034	0,065	0,014	0,091	0,051	0,044	0,06	0,044	0,016	0,04	0,058
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl	0,013	0,006	0	0,01	0	0,006	0	0,012	0,009	0	0,012	0
NiO	0,079	0,047	0	0,083	0	0	0,036	0,032	0,014	0	0,029	0
V ₂ O ₃	0,051	0	0	0,033	0,094	0,03	0,017	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
Total	98,993	98,326	98,39	98,345	98,556	98,276	99,497	98,421	99,292	98,435	98,251	100,569

Number of cations per 8 oxygens

Si	2,402	2,655	2,628	2,402	2,479	2,496	2,449	2,585	2,46	2,40	2,53	2,40
Al	1,584	1,317	1,347	1,572	1,510	1,478	1,516	1,399	1,53	1,59	1,46	1,58
Ti	0,000	0,003	0,000	0,005	0,001	0,000	0,007	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,002	0,003	0,002	0,000	0,003	0,003	0,001	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000	0,003	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,000	0,002	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,625	0,367	0,408	0,622	0,545	0,542	0,597	0,455	0,53	0,59	0,46	0,61
Na	0,383	0,676	0,618	0,407	0,447	0,484	0,426	0,549	0,48	0,42	0,56	0,42
K	0,002	0,002	0,004	0,001	0,005	0,003	0,003	0,003	0,00	0,00	0,00	0,00
Or	0,220	0,189	0,366	0,080	0,533	0,291	0,249	0,346	0,25	0,09	0,23	0,32
Ab	37,932	64,719	59,989	39,524	44,814	47,047	41,512	54,516	47,34	41,20	54,99	40,82
An	61,848	35,092	39,644	60,396	54,652	52,662	58,239	45,138	52,41	58,71	44,78	58,86

Name	Labradorita	Andesina	Andesina	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Labradorita	Andesina	Labradorite	Labradorite	Andesine	Labradorite
-------------	-------------	----------	----------	-------------	-------------	-------------	-------------	----------	-------------	-------------	----------	-------------

Microprobe data for feldspar

	Peridotite	Granitic Vein			Feldspathic Peridotite
Sample	MNN01	MNN08	MNN08	MNN08	MNS14
No.	1	1	2	3	1
SiO ₂	51,724	58,859	63,181	60,372	53,04
TiO ₂	0,166	0	0,03	0	0,222
Al ₂ O ₃	29,014	24,657	18,196	23,901	28,578
Cr ₂ O ₃	0	0	0,07	0,047	0,06
FeO	0,429	0,05	0	0,003	0,004
MnO	0,096	0	0	0	0,041
MgO	0,249	0	0,02	0	0,021
CaO	11,513	6,848	0,035	5,648	12,274
Na ₂ O	4,962	7,508	0,916	8,399	4,805
K ₂ O	0,105	0,188	15,654	0,145	0,007
F	0	0	0	0	0
Cl	0,015	0,005	0,009	0,033	0
NiO	0,007	0,022	0	0	0
V ₂ O ₃	0,047	0,025	0	0	0,019
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na
Total	98,324	98,161	98,109	98,541	99,071
Number of cations per 8 oxygens					
Si	2,39	2,67	2,98	2,72	2,427
Al	1,58	1,32	1,01	1,27	1,541
Ti	0,01	0,00	0,00	0,00	0,008
Fe	0,02	0,00	0,00	0,00	0,000
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,002
Mg	0,02	0,00	0,00	0,00	0,001
Ca	0,57	0,33	0,00	0,27	0,602
Na	0,44	0,66	0,08	0,73	0,426
K	0,01	0,01	0,94	0,01	0,000
Or	0,61	1,08	91,67	0,82	0,040
Ab	43,55	65,77	8,15	72,31	41,450
An	55,84	33,15	0,17	26,87	58,510
Name	Labradorite	Andesine	KF	Andesine	Labradorita

Microprobe data for biotite-phlogopite

Rock	Norite												Amphibolite					Granitic Vein		Harzburgite
Sample No.	MNS12 1	MNS12 2	MNS12 3	MNS07 1	MNS07 2	MNN16 1	MNN16 2	MNN16 3	MNN16 4	MNN12 1	MNN12 2	MNS10 1	MNS10 2	MNS10 3	MNS08 1	MNN15 1	MNN15 2	MNN08 1	MNN08 2	MNN05 1
SiO ₂	38,79	38,79	39,29	37,22	38,42	38,68	38,50	38,22	37,53	36,65	36,52	39,22	39,24	38,73	46,66	38,46	38,65	35,03	35,14	38,76
TiO ₂	0,78	1,42	1,61	3,03	2,63	1,35	2,17	1,42	2,37	4,18	4,70	1,62	1,28	0,60	0,38	2,21	2,04	4,29	3,26	0,34
Al ₂ O ₃	16,91	17,18	17,26	16,68	16,68	18,49	17,30	17,78	17,56	15,59	15,47	17,05	18,66	19,27	33,65	17,35	17,56	15,55	16,03	17,42
FeO	11,74	10,43	11,36	10,68	9,60	9,21	10,04	9,49	9,80	15,00	12,83	9,38	8,38	8,67	1,78	9,32	8,97	23,51	23,62	4,57
MnO	0,07	0,04	0,06	0,00	0,00	0,00	0,10	0,05	0,08	0,09	0,08	0,05	0,16	0,00	0,05	0,05	0,02	0,27	0,21	0,14
MgO	16,94	17,17	15,80	16,91	17,56	18,34	17,58	18,38	17,02	13,52	14,00	17,77	17,97	17,43	1,12	17,35	17,68	6,91	6,65	23,79
CaO	0,00	0,01	0,03	0,02	0,02	0,00	0,05	0,03	0,00	0,01	0,03	0,02	0,00	0,05	0,03	0,03	0,02	0,00	0,00	0,03
Na ₂ O	0,37	0,44	0,33	0,20	0,33	0,25	0,32	0,27	0,23	0,17	0,03	0,27	0,36	0,35	1,33	0,31	0,29	0,07	0,03	1,29
K ₂ O	8,53	8,64	8,68	8,90	8,69	8,94	8,87	8,77	9,28	9,52	9,88	8,67	8,90	9,09	8,63	9,03	8,72	9,56	9,84	7,72
F	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,27	0,00
Cl	0,06	0,09	0,05	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	0,00
Cr ₂ O ₃	0,02	0,00	0,30	0,31	0,47	0,10	0,16	0,06	0,14	0,55	0,42	0,13	0,09	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,15
NiO	0,08	0,04	0,13	0,10	0,14	0,01	0,08	0,16	0,13	0,07	0,11	0,16	0,12	0,03	0,00	0,07	0,13	0,00	0,10	0,24
H ₂ O*	4,07	4,04	4,10	4,06	4,11	4,18	4,14	4,13	4,08	4,00	3,98	4,12	4,18	4,13	4,45	4,11	4,12	3,71	3,68	4,22
Subtotal	98,36	98,36	98,99	98,12	98,68	99,54	99,31	98,75	98,22	99,35	98,05	98,49	99,36	98,38	98,08	98,37	98,29	99,15	98,82	98,66
O=F,Cl	0,01	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,10	0,11	0,00
Total	98,34	98,31	98,98	98,12	98,67	99,54	99,30	98,74	98,22	99,35	98,04	98,49	99,36	98,37	98,08	98,37	98,29	99,05	98,70	98,66
Si	5,70	5,67	5,73	5,50	5,60	5,55	5,58	5,55	5,51	5,49	5,50	5,70	5,62	5,61	6,28	5,61	5,62	5,49	5,53	5,51
Al iv	2,30	2,33	2,27	2,50	2,40	2,45	2,42	2,45	2,49	2,51	2,50	2,30	2,38	2,39	1,72	2,39	2,38	2,51	2,47	2,49
Al vi	0,63	0,64	0,69	0,40	0,46	0,69	0,53	0,59	0,56	0,24	0,25	0,61	0,77	0,90	3,62	0,59	0,63	0,36	0,51	0,43
Ti	0,09	0,16	0,18	0,34	0,29	0,15	0,24	0,16	0,26	0,47	0,53	0,18	0,14	0,07	0,04	0,24	0,22	0,51	0,39	0,04
Cr	0,00	0,00	0,03	0,04	0,05	0,01	0,02	0,01	0,02	0,06	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
Fe	1,44	1,28	1,38	1,32	1,17	1,11	1,22	1,15	1,20	1,88	1,62	1,14	1,00	1,05	0,20	1,14	1,09	3,08	3,11	0,54
Mn	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,04	0,03	0,02
Mg	3,71	3,74	3,43	3,72	3,81	3,93	3,80	3,98	3,73	3,02	3,14	3,85	3,84	3,76	3,98	3,77	3,83	1,61	1,56	5,04
Ni	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,03
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,10	0,12	0,09	0,06	0,09	0,07	0,09	0,07	0,07	0,05	0,01	0,07	0,10	0,10	0,35	0,09	0,08	0,02	0,01	0,36
K	1,60	1,61	1,61	1,68	1,61	1,64	1,64	1,62	1,74	1,82	1,90	1,61	1,63	1,68	1,48	1,68	1,62	1,91	1,98	1,40
OH*	3,99	3,94	3,99	4,00	3,99	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,99	3,99	3,99	4,00	3,99	4,00	3,88	3,87	4,00
F	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,13	0,00
Cl	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
Y total	5,89	5,82	5,74	5,83	5,80	5,88	5,82	5,91	5,79	5,69	5,61	5,82	5,80	5,78	4,09	5,76	5,80	5,60	5,60	6,11
X total	1,70	1,74	1,71	1,74	1,71	1,71	1,74	1,70	1,81	1,87	1,91	1,68	1,73	1,79	1,83	1,77	1,70	1,93	1,98	1,76
Al total	2,93	2,96	2,96	2,90	2,86	3,13	2,95	3,04	3,04	2,75	2,75	2,92	3,15	3,29	5,34	2,98	3,01	2,87	2,97	2,92
Fe/Fe+Mg	0,28	0,25	0,29	0,26	0,23	0,22	0,24	0,22	0,24	0,38	0,34	0,23	0,21	0,22	0,47	0,23	0,22	0,66	0,67	0,10
Mn/Mn+Fe	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03
Total Al	2,93	2,96	2,96	2,90	2,86	3,13	2,95	3,04	3,04	2,75	2,75	2,92	3,15	3,29	5,34	2,98	3,01	2,87	2,97	2,92
Mg-Li	3,71	3,74	3,43	3,72	3,81	3,93	3,80	3,98	3,73	3,02	3,14	3,85	3,84	3,76	3,98	3,77	3,83	1,61	1,56	5,04
Fe+Mn+Ti-AIVI	0,91	0,80	0,88	1,26	1,00	0,57	0,93	0,72	0,92	2,12	1,91	0,71	0,39	0,21	-3,38	0,79	0,69	3,26	3,02	0,17