

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**EVOLUÇÃO MINERALÓGICA DA PORÇÃO NORTE DO  
OFIOLITO BOSSOROCA, TERRENO SÃO GABRIEL**

**AMANDA JULIANO MASSUDA**

**ORIENTADOR – Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann**

**Porto Alegre - 2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**EVOLUÇÃO MINERALÓGICA DA PORÇÃO NORTE DO  
OFIOLITO BOSSOROCA, TERRENO SÃO GABRIEL**

AMANDA JULIANO MASSUDA

ORIENTADOR – Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Juliana Pertille da Silva – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Viter Magalhães Pinto – Universidade Federal de Pelotas

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Geociências.

Porto Alegre – 2020

## **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**Vice-Reitor:** Jane Fraga Tutikian

## **INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Massuda, Amanda Juliana

Evolução mineralógica da porção norte do ofiolito bossoroca, terreno São Gabriel. / Amanda Juliano Massuda . - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2019.

[65 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2018.

Orientador: Léo Afraneo Hartmann

1. Ofiolito Bossoroca. 2. Metassomatitos. 3. Química-mineral. I. Título.

CDU 550.4

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Alexandre Ribas Semeler

CRB10/1900

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS, pela oportunidade da minha formação em uma instituição de excelência.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos.

Em especial, ao meu orientador, professor doutor Léo Afraneo Hartmann, pela excepcional orientação profissional e pessoal em cada etapa deste mestrado.

Agradeço, também, a professora dra. Gláucia Nascimento Queiroga e ao Dr. Marco Paulo Castro pelo auxílio técnico e científico, tornando possível o desenvolvimento deste trabalho.

À Tiara Cerva Alves, Mariana Werle, Sandro K. Duarte e Vitor Casagrande, pelo apoio, incentivo e parceria ao longo destes dois anos.

Por fim, agradeço minha família pelo incondicional suporte e aos amigos, por tornarem minha jornada mais alegre.

## RESUMO

O Ofiolito Bossoroca pertence ao Complexo Bossoroca e é limitado pelo Complexo Cambaí, ao oeste, e pela Formação Campestre, ao leste. A obducção deste corpo ocorreu durante o Neoproterozoico, de oeste para leste. Este evento causou o metamorfismo das rochas em fácies anfibolito inferior, predominantemente. A Formação Arroio Lajeado, que abrange as rochas ofiolíticas, é composta de serpentinito, anfibolito, tremolita xisto, formação ferrífera bandada, metachert e rochas metassomáticas. Com o objetivo de interpretar a evolução mineralógica do metamorfismo de rochas representativas do ofiolito, foram utilizadas análises químicas por microsonda eletrônica e geoquímica de rocha total. Hornblenda, turmalina e cromita são os principais minerais indicadores da evolução tectônica e pós-tectônica das rochas da região. Hornblenda é encontrada em anfibolito, Formação Arroio Lajeado, em duas fases metamórficas: M1 como tschermakita, e M2 como magnesiohornblenda. O mineral também é encontrado na rocha metavulcanoclástica, Formação Campestre, como magnesiohornblenda, com tendência indicando aumento de álcalis (site A) e Al, Fe e Ti (site C) entre a primeira e segunda geração. Outra ocorrência da magnesiohornblenda é no Diorito Capivaras, Complexo Cambaí, com diminuição de álcalis no site A e aumento de Al, Fe e Ti no site C entre a primeira e segunda geração. Turmalina é classificada como dravita e está relacionada ao cloritito de blackwall. Cromita ocorre em cromita-talco-magnesita granofels e possui textura corona de magnetita. Todas essas características dos minerais citados indicam duas fases de metamorfismo em fácies anfibolito inferior e a ocorrência de metassomatitos no ofiolito. Por meio de aerogeofísica, foi possível delimitar as unidades estratigráficas com características químicas e magnéticas significativamente distintas.

**Palavras-chave:** Ofiolito Bossoroca, metassomatitos, química mineral.

## ABSTRACT

The Bossoroca Ophiolite belongs to the Bossoroca Complex and is limited by the Cambaí Complex, to the west, and the Campestre Formation, to the east. The obduction of this body occurred during the Neoproterozoic, from west to east. This event caused the metamorphism of rocks in lower amphibolite facies, predominantly. The Arroio Lajeado Formation, which includes ophiolitic rocks, is composed of serpentinite, amphibolite, tremolite, banded iron formation, metachert and metasomatic rocks. To interpret the mineralogical evolution of the metamorphism of representative rocks of the ophiolite, chemical analyses by electronic microprobe and geochemistry of total rock were used. Hornblende, tourmaline and chromite are the main minerals that indicate the tectonic and post-tectonic evolution of the rocks. Hornblende is found in amphibolite, Arroio Lajeado Formation, in two metamorphic phases: M1 as tschermakite, and M2 as magnesiohornblende. The mineral is also found in the metavolcanoclastic rock, Campestre Formation, as magnesiohornblende, with a trend indicating an increase in alkalis (site A) and Al, Fe and Ti (site C) between the first and second generations. Another occurrence of magnesiohornblende is in Capivaras Diorite, Cambaí Complex, with a decrease in alkalis at site A and an increase in Al, Fe and Ti at site C between the first and second generations. Tourmaline is classified as dravite and is related to blackwall chloritite. Chromite occurs in chromite-talc-magnesite granofels and has a corona magnetite texture. All these characteristics indicate two phases of metamorphism in lower amphibolite facies and the occurrence of metasomatites in the ophiolite. Through aerogeophysics, it was possible to delimit stratigraphic units with significantly different chemical and magnetic characteristics.

Keywords: Bossoroca ophiolite, metasomatite, mineral chemistry.

## LISTAS

### LISTA DE FIGURAS

- |          |   |           |
|----------|---|-----------|
| Figura 1 | Coluna estratigráfica do Terreno São Gabriel proposta por Philipp et al. (2018). Extraído do trabalho original. | Página 4  |
| Figura 2 | Esquema estratigráfico do Bloco São Gabriel sugerido por Saalman et al. (2005).                                 | Página 5  |
| Figura 3 | Mapa geológico do Terreno São Gabriel. Modificado de Arena et al. (2017).                                       | Página 7  |
| Figura 4 | Mapa geológico do Complexo Bossoroca. Modificado de Gubert et al., (2016).                                      | Página 8  |
| Figura 5 | Transectas delimitadas das áreas de estudo.   | Página 12 |
| Figura 6 | Amostras pulverizadas para geoquímica de rocha total e lâminas delgadas.  | Página 13 |

### LISTA DE TABELA

- |          |  |          |
|----------|--|----------|
| Tabela 1 | Estratigrafia proposta para o Terreno São Gabriel. | Página 6 |
|----------|--|----------|

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	1
1.2 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
2 CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE E CONTEXTO GEOLÓGICO .....	3
2.1 TERRENO SÃO GABRIEL.....	3
2.2 COMPLEXO BOSSOROCA .....	8
2.3 FORMAÇÃO ARROIO LAJEADINHO .....	9
2.4 METASSOMATITOS.....	10
3 CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS .....	12
3.1 ETAPA PRÉ CAMPO .....	12
3.2 ETAPA DE CAMPO .....	12
3.3 ETAPA PÓS-CAMPO.....	13
3.4 OBTENÇÃO DE DADOS .....	14
4 CAPÍTULO IV – MANUSCRITO DO ARTIGO .....	16
5 CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
6 REFERÊNCIAS .....	58
APÊNDICE A- ARTIGO SUBMETIDO DE ASSUNTO AFIM.....	63



## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Os estudos de ofiolitos têm-se aperfeiçoado e desenvolvido nos últimos anos, tornando mais completa a compreensão de processos geotectônicos, petrogenéticos e evolutivos das rochas envolvidas. Esses avanços são devidos a descobertas de metassomatitos e desenvolvimento de modelos e processos aos quais os ofiolitos foram submetidos.

Rochas metassomáticas, como rodingitos, clorititos de blackwall, listvenitos, assim como turmalinitos e albititos, fornecem informações relevantes sobre idade, processos geoquímicos e metamórficos aos quais os protólitos foram sujeitos. Isso se deve à descoberta de minerais de referência e demarcadores de mudanças petrológicas, como zircão, cromita, carbonatos, turmalina e anfibólios.

Os espinélios são bons marcadores petrogenéticos devido à sua capacidade de cristalizar em diversas condições, em rochas máficas e ultramáficas. Possuem uma ampla gama de soluções sólidas e são resistentes à alteração (BARNES & ROEDER, 2001). A ocorrência de carbonatos associados a serpentinitos é devida à reação em baixa temperatura de fluidos ricos em CO<sub>2</sub> (DABITZIAS 1980; MOLLER 1989A, B; HAMDY 1997 *apud* GHONEIM *et al.*, 2003). A compreensão dos processos envolvidos na carbonatização de serpentinitos é de interesse econômico por serem promissores depósitos de ouro (HALLS & ZHAO, 1995).

A turmalina de origem oceânica tem sido alvo de estudos recentes (Arena *et al.*, 2017, HARTMANN *et al.*, 2019) devido à sua capacidade de registrar mudanças isotópicas de ambiente, assim como por serem capazes de portar zircão. Devido à complexa composição química e grande sensibilidade a modificações, anfibólios são importantes marcadores de metamorfismo. A ampla ocorrência deste mineral, de rochas félsicas a máficas, permite abranger regionalmente a influência do metamorfismo.

Tendo em vista a diversidade de informações que os minerais presentes em rochas ofiolíticas oferecem, este presente estudo traz dados de química mineral e geoquímica que visam esclarecer as relações de equilíbrio das assembleias e a origem das rochas do Ofiolito Bossoroca.

### 1.1 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo a determinação da evolução mineralógica das rochas metaultramáficas, metamáficas e metassomáticas ocorrentes na região norte do Ofiolito Bossoroca, Formação Arroio Lajeado. Estão incluídas as rochas hospedeiras circundantes, pertencentes à Formação Campeste (a leste) e ao Complexo Cambaí (a oeste). Além disto, buscou-se

delimitar espacialmente as unidades e a classificação geoquímica e geotectônica das rochas. A datação U-Pb de zircão por LA-ICPMS na Universidade Federal de Ouro Preto foi organizada em artigo de Hartmann et al. (2020), e não faz parte dos objetivos desta dissertação.

## 1.2 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação se estrutura em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

No primeiro capítulo, são abordados a introdução, objetivos, estrutura e organização da dissertação.

No capítulo II, o estado da arte e contexto geológico da área de estudo, o Ofiolito Bossoroca, são abordados.

No capítulo III são explicados os materiais e métodos utilizados nesta dissertação.

O capítulo V traz em anexo o artigo submetido no periódico *Brazilian Journal of Geology*, com o título *Mineralogical Evolution of metasomatic and associated rocks in northern Bossoroca ophiolite, São Gabriel terrane*. Este capítulo compõe o corpo principal da dissertação.

No capítulo IV são apresentadas as considerações finais.

## CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE E CONTEXTO GEOLÓGICO

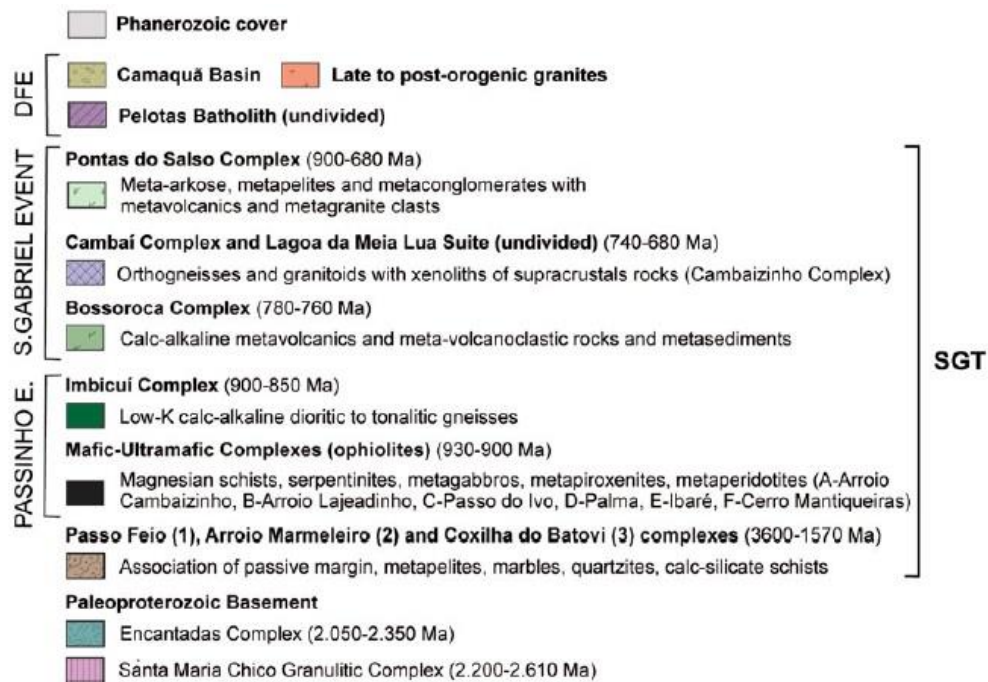
Os ofiolitos brasileiros são de idade Neoproterozoica, relacionados ao Ciclo Brasileiro. Estes representantes de crosta oceânica e manto se espalham pelos cinturões Dom Feliciano, Ribeira e Araçuaí, orógenos que possuem correspondentes contemporâneos no continente africano (PHILIPP *et al.*, 2016).

O Orógeno Dom Feliciano se desenvolveu pela amalgamação de quatro arcos (Passinho, São Gabriel, Porongos e Dom Feliciano) em dois principais eventos orogênicos (CHEMALE, 2000; HARTMANN *et al.*, 2007; SAALMANN *et al.*, 2010; PHILIPP *et al.*, 2016a).

### 1.3 TERRENO SÃO GABRIEL

Philipp *et al.* (2018), ao caracterizarem a evolução do Terreno São Gabriel, propõem que tal unidade se constitua de remanescentes ofiolíticos e dois arcos magmáticos neoproterozóicos: Passinho, mais antigo, de origem intraoceânica, e São Gabriel, mais novo, como um arco de margem continental ativa. O Terreno é limitado por duas zonas de cisalhamento: Caçapava do Sul, a leste, e Ibaré, ao sul.

Os autores englobam as rochas do TSG em quatro principais associações: complexos metassedimentares, prisma acrescionário Palma, rochas relacionadas a arco e rochas vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã e rochas plutônicas associadas. O prisma acrescionário, segundo os autores, é composto por fatias tectônicas de complexos ofiolíticos, compreendendo xistos magnesiano, serpentinito e anfibolito e, em menor proporção, metagabro, metaperidotito, metapiroxenito e metaanortosito. As rochas relacionadas ao arco são os paragnaisses do Complexo Cambaizinho, ortognaisses do Complexo Passinho (890–860 Ma) e rochas metavulcanossedimentares do Complexo Bossoroca (780–760 Ma), ortognaisses e granitoides do Complexo Cambaí (740–700 Ma) e granitoides da Suíte Lagoa da Meia Lua (700–680 Ma).



**Figura 1.** Coluna estratigráfica do Terreno São Gabriel proposta por Philipp et al. (2018). Extraído do trabalho original.

Por sua vez, Saalman *et al.*, (2005) subdividiram a estratigrafia do Bloco São Gabriel em duas principais unidades: sucessão vulcanossedimentar metamorfisada do Grupo Palma e o Complexo Cambaí. O Grupo Palma, segundo os autores, é constituído por rochas metavulcânicas ultramáficas e máficas intercaladas a xistos e gnaisses de origem metassedimentar. Este grupo pode ser subdividido em duas unidades, inferior e superior, correspondendo às formações Cerro do Ouro e Cambaizinho, respectivamente.

A primeira é composta principalmente por metabasaltos, anfíbolitos e rochas ultramáficas como xisto magnésiano e serpentinito (REMUS *et al.*, 1993), intrudida por granitos orientados segundo a foliação regional (SAALMANN *et al.*, 2005). A Formação Cambaizinho seria constituída por paragneisse, quartzito, metapelito e gnaisse anfíbolítico (SAALMANN *et al.*, 2005), incluindo a Formação Campestre, representada por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas de baixo grau metamórfico. Remus et al. (1999), ao datarem zircões magmáticos, chegaram à idade de  $757 \pm 17$  Ma.

<b>LATE-/POST-TECTONIC</b>	<b>Camaçã basin</b> volcano-sedimentary	<b>Caçapava granite</b> <b>Lavras granite</b>	560 <sup>1</sup> 595 <sup>1</sup>
		<b>Santa Zélia granite</b>	?
<b>LATE-TECTONIC</b>	<b>Sanga do Jobim granite &amp; equivalents</b>		697 <sup>2</sup>
?	<b>CAMBAÍ COMPLEX</b>	<b>Cambaí Complex</b>	granodioritic, trondhjemitic, 700-750 <sup>3,4</sup>
		<b>Campestre Fm</b> Metandesite, metavolcanoclastics, subordinate metapelite	tonalitic, dioritic gneisses 750-780 <sup>5</sup> Campestre Fm
?	<b>PALMA GROUP</b>	<b>Cerro do Ouro Fm</b> serpentinite, amphibolite, magnesian schist; juxtaposed lenses of quartzite and marble	<b>Cambaizinho Fm</b> paragneiss, various schist, metapelite serpentinite, amphibolite, magnesian schist 750-900 / < 1300 <sup>6</sup>
<b>PASSO FEIO FM</b>		<b>Passo Feio North Fm</b> meta-arenite, metapelite, metatuff, chlorite schist	
		<b>Passinho metadiorite</b>	879 <sup>4</sup>

Figura 2. Esquema estratigráfico do Bloco São Gabriel sugerido por Saalman et al. (2005).

Diversos autores interpretam a Formação Campestre como a porção vulcânica do arco magmático, tendo o Complexo Cambaí como contraparte plutônica. Este complexo, segundo Saalman et al. (2005), consiste em metadiorito juvenil, metatonalito e metatrondhjemitico, deformados e metamorfisados a gnaiss. Essas rochas possuem assinaturas calcio-alcálicas, deduzidas como formadas em ambiente de arco magmático (CHEMALE *et al.*, 1995; BABINSKI *et al.*, 1996). Leite *et al.*, (1998), datando tonalitos, chegaram à idade de  $750 \pm 15$  Ma para o complexo.

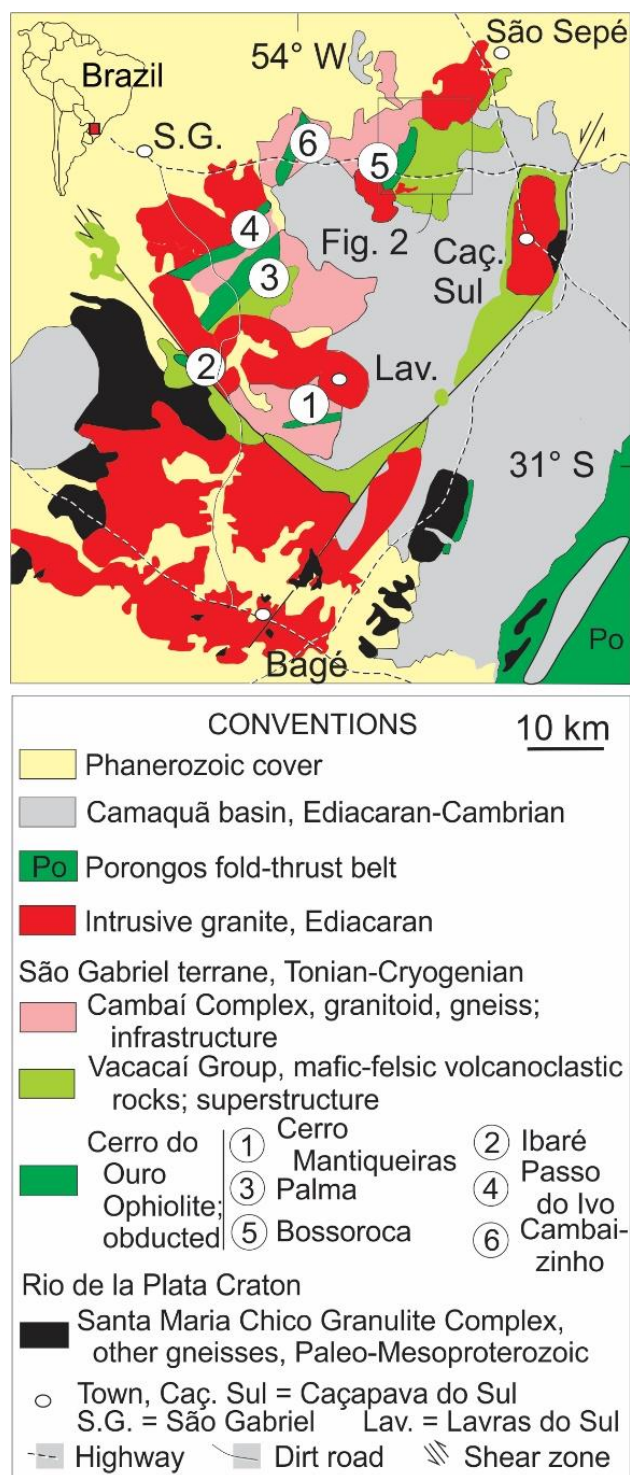
Este presente trabalho sugere uma nova estratigrafia simplificada e coerente para o Terreno São Gabriel e unidades associadas.

**Tabela 1.** Estratigrafia proposta para o Terreno São Gabriel.

Geotectônica	Unidade estratigráfica	Descrição	Idade, Ma
Intraplaca	Bacia do Paraná	Siltito, algum lamito, conglomerado, calcário	450-60
Pós-orogênico	Granitos São Sepé, Ramada, São Manoel, Lavras	Nível raso, forte auréola de contato	600-550
Foreland	Bacia do Camaquã	Vulcânicas, traquiandesito, rochas sedimentares	575
Arco de ilha São Gabriel	Supraestrutura, Grupo Vacacaí – Formações Campestre, Pontas do Salso, Bela Vista, Passo Feio (pacial)	Rochas vulcânicas e sedimentares de arco de ilha, turbidito, grauva-ca, tufo, andesito	755
	Infraestrutura, Complexo Cambaí – Suíte Lagoa da Meia-Lua, Granito Sanga do Jobim, Granodiorito Cerca de Pedra, Diorito Capivaras, Gnaiss Imbicuí	Rochas graníticas sintectônicas, sem metamorfismo de contato nos ofiolitos ou Grupo Vacacaí.	(770), 730-700, 690
Crosta oceânica + manto	Ofiolito Cerro do Ouro: Ofiolitos Cerro Mantiqueiras, Cambaizinho, Palma, Ibaré, porções do Passo Feio	Ultramáfica, máfica, andesítica, rochas vulcanossedimentares	920-720
	Ofiolito Bossoroca (Formação Arroio Lajeado)	Foliação de mergulho abrupto com direção NNE e mergulho WNW. Talco-olivina metaserpentinó, anfíbolito, BIF, gabro-harzburgito. Metassomatitos – Chromita-talcomagnessita fels, tourmalinito, rodingito, cloritito. Obductado na base da supraestrutura. Ouro aluvionar	920-720

Os ofiolitos ocorrentes no Terreno São Gabriel (ARENA *et al.*, 2016, 2017, 2018; PHILIPP *et al.*, 2018; HARTMANN *et al.*, 2019), assim como ao leste do Batólito Pelotas (RAMOS *et al.*, 2018), e no cinturão de dobramentos e cavalgamentos Porongos (PERTILLE *et al.*, 2017; ARENA *et al.*, 2018), são os

registros preservados do oceano proto-Adamastor, gerado pela fragmentação de Rodinia.



**Figura 3.** Mapa geológico do Terreno São Gabriel. Modificado de Arena *et al.* (2017).

## 1.4 COMPLEXO BOSSOROCA

As rochas do Complexo Bossoroca foram descritas por Hartmann et al. (1985), que as nomearam como Sequência Bossoroca, que incluía as litologias da Formação Vacacaí. Gubert *et al.*, (2016) propuseram três unidades estratigráficas para as rochas localizadas na região entre São Sepé e Vila Nova: Sequência Sanga do Areal, Sequência Bossoroca e Complexo granítico-gnáissico Cambaí. Koppe *et al.* (1985 *In* GUBERT *et al.*, 2016) estudaram as rochas circundantes à mina de ouro Bossoroca e sugeriram a essas sequências a nomenclatura Complexo Bossoroca. Este se subdivide em Sequência Arroio Lajeado, que inclui rochas metaultramáficas, metamáficas, metachert, formações ferríferas bandadas e o Gabro de Mata Grande; e Sequência Campestre, composta majoritariamente por rochas metavulcanoclásticas e, em menor abundância, rochas metassedimentares.

Gubert *et al.* (2016) caracterizaram o Complexo Bossoroca como rochas metavulcânicas, metavulcanoclásticas e metassedimentares metamorfisadas em fácies xisto verde, compreendendo um cinturão de 25 km de comprimento e 15 km de largura, com direção N20°E. De acordo com os autores, o complexo tem contato a oeste com o complexo ofiolítico Arroio Lajeado (Formação Arroio Lajeado) seguindo a Falha Bossoroca. A norte, é intrudido pelo Granito São Sepé e a sul, pelos granitos Cerro da Cria e Ramada. A oeste, está em contato com o Complexo Cambaí. É coberto parcialmente pelas rochas vulcânicas da Bacia Camaquã e sedimentos da Bacia do Paraná.

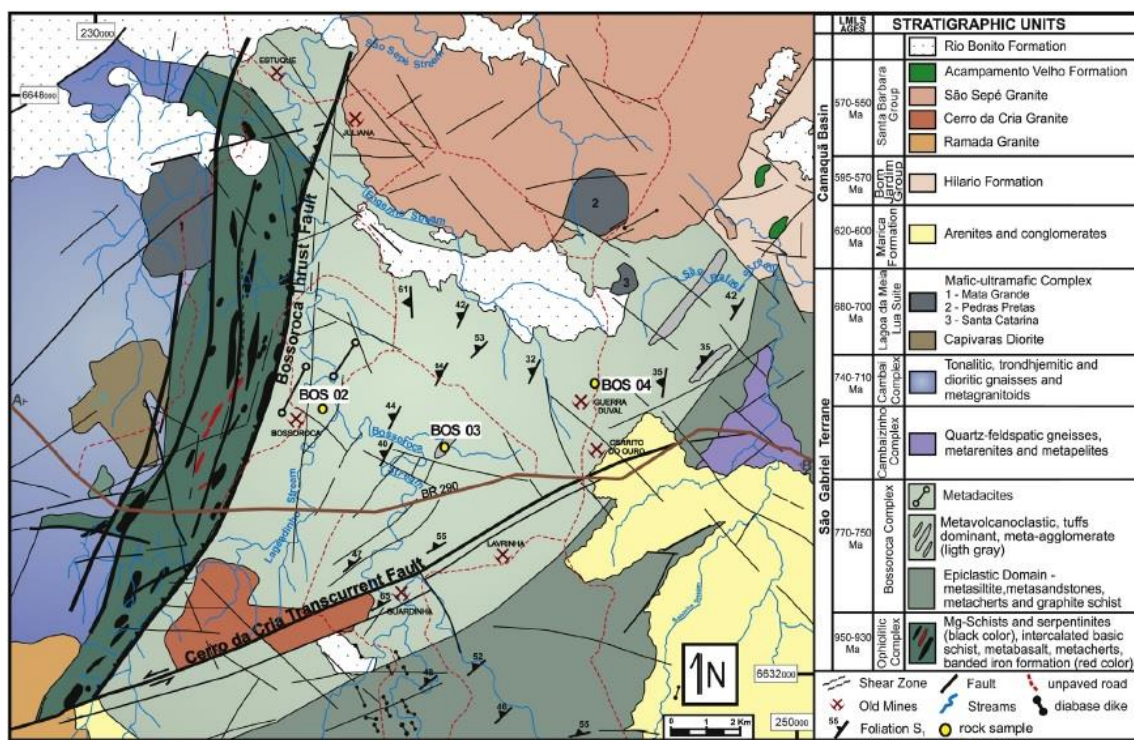


Figura 4. Mapa geológico do Complexo Bossoroca. Modificado de Gubert et al., (2016).



Os autores descrevem quatro litotipos para o Complexo Bossoroca: meta-cristal tufo, metatufo, metargilito grafitoso, metargilito e metarenito. Estes litotipos apresentam assembleia contendo quartzo + albita/oligoclásio + biotita + sericita + epidoto (+ hornblenda + almandina), predominando as metavulcânicas a oeste e metassedimentares a leste. As rochas do complexo foram afetadas por evento de deformação regional e possuem duas foliações principais: xistosidade  $S_1$ , que gera dobras isoclinais  $F_2$ , e clivagem de crenulação  $S_2$ . A fase de deformação  $D_2$  gerou foliação milonítica pervasiva em todo o complexo, evidenciada por sistemas de falhas de empurrão com vergência SE.

Gubert *et al.* (2016) dataram zircões de duas amostras e concluíram que tais minerais são de origem magmática, com idade concórdia de  $767.2 \pm 2.9$  Ma para cristalização. Remus *et al.* (1999) chegaram à idade de  $757 \pm 17$  Ma para metatufo dacítico da supraestrutura. Hartmann *et al.*, (2020) obtiveram idade magmática de  $842 \pm 5$  Ma para rochas da Formação Campestre (metavulcanoclásticas do Complexo Bossoroca), e concluíram que os grãos de zircão das amostras são detríticos.

## 1.5 FORMAÇÃO ARROIO LAJEADINHO

Wildner (1990) realizou um trabalho abrangente da geologia da região da Bossoroca. O autor descreve a Sequência Arroio Lajeado como pertencente ao Subgrupo Cerro Mantiqueiras, do Grupo Porongos. Essa sequência é caracterizada pela presença de serpentinito, tremolitito, talco xisto, tremolita-talco xisto, cloritito e rodingito, bem como gabro, basalto, anfibolito e chert. Todos os litotipos são metamorfisados a fácies xisto verde relacionados a um processo deformacional em zona de cisalhamento. O contato tectônico entre a Sequência Arroio Lajeado e a Sequência Campestre, segundo o autor, é paralelo à foliação principal da área e o litotipo encontrado é brechado, predominando metasserpentinito.

Três associações litológicas foram descritas para englobar as rochas da Sequência: rochas gabróicas e basálticas; rochas serpentiniticas e rochas metassomáticas. Wildner (1990) relaciona a primeira associação a derrames e diques, mesmo não sendo observadas estruturas primárias de tal origem. A assembleia dessas rochas é formada por plagioclásio, hornblenda-actinolita, clorita, epidoto, apatita, titanita, carbonato e opacos.

Em predomínio de ocorrência, aflorando em toda a sequência máfica-ultramáfica, encontram-se serpentinitos em corpos alongados imersos em uma miscelânea de tremolititos, clorititos, talco-xistos e xistos máfico-ultramáficos. Em lâmina, os serpentinitos se compõem por cristais alongados de olivina pseudomorfizada em serpentina, e talco, com foliação incipiente. Essa relação textural é denominada de jackstraw. São encontradas também abundante tremolita e clorita clinocloro. Wildner (1990) descreve diversas texturas de rocha para os serpentinitos. Em uma das variações dessa rocha é relatada a presença

do carbonato magnesita, levando o autor a classificá-la como listvenito. Este litotipo se encontra proximal à zona de cisalhamento.

A terceira associação litológica descrita por Wildner (1990), os metassomatitos, xistos magnesianos à base de magnesita + clorita + talco, com teor de MgO entre 32% e 40%; talco + tremolita + clorita, com MgO entre 20% e 30%; tremolita + clorita, podendo conter ou não plagioclásio, com teores magnesianos mais baixos que as anteriores e rochas gabroicas diferenciadas com presença de clorita + epidoto + carbonato. Clorititos também são encontrados e associados à origem metassomática.

## 1.6 METASSOMATITOS

Metassomatismo pode ser definido como metamorfismo acompanhado de mudança composicional da rocha. Esta mudança é favorecida em situações de grande contraste composicional entre rochas e grande mobilidade de elementos. O metassomatismo pode ocorrer através de difusão, quando os componentes fluem através de outro meio (sólido ou fluido); e infiltração, processo no qual o fluido é submetido a pressão externa que causa sua movimentação.

Rochas ultramáficas são ambientes propícios para ocorrência de metassomatismo devido ao contraste composicional entre elas e as encaixantes, normalmente rochas pelíticas quartzo-feldspáticas. A dimensão da reação metassomática nesse cenário é diretamente dependente das condições de P-T, composição das rochas adjacentes e a natureza e mobilidade da fase fluida. Pelo fato de as assembleias ultramáficas serem simplificadas a Mg, Fe e Si, as fases minerais tendem a ser, da mesma forma, em número reduzido. A partir do momento que algum destes elementos é mobilizado, a rocha lixiviada tende a reduzir suas fases minerais, gerando rochas monominerálicas ou biminerálicas (WINTER, 2001).

Inicialmente utilizada para nomear clorititos metassomáticos, o termo blackwall tornou-se amplamente adotado para referir-se a qualquer rocha metassomática associada a corpos ultramáficos. A dinâmica zonal de blackwalls foi estudada por autores como Sanford (1982, *apud* WINTER, 2001), que examinou amostras de rochas ultramáficas metamorfisadas nas fácies xisto verde e anfibólito. O autor chegou a seguinte sequência de zonação:

Núcleo → borda

(rocha ultramáfica) | talco + carbonato | anfibólio + clorita | clorita | transição | rocha hospedeira

No Terreno São Gabriel, estudos recentes de Arena et al. (2016, 2017, 2018) e Hartmann et al. (2019) abordaram metassomatitos dos ofiolitos. Arena et al. (2016) utilizaram zircões obtidos em albititos dos ofiolitos Cerro Mantiqueiras e Ibaré para obter idade dos ofiolitos. Chegaram ao resultado de  $923 \pm 3$  Ma no núcleo e  $786 \pm 13$  Ma nas bordas dos cristais do Cerro

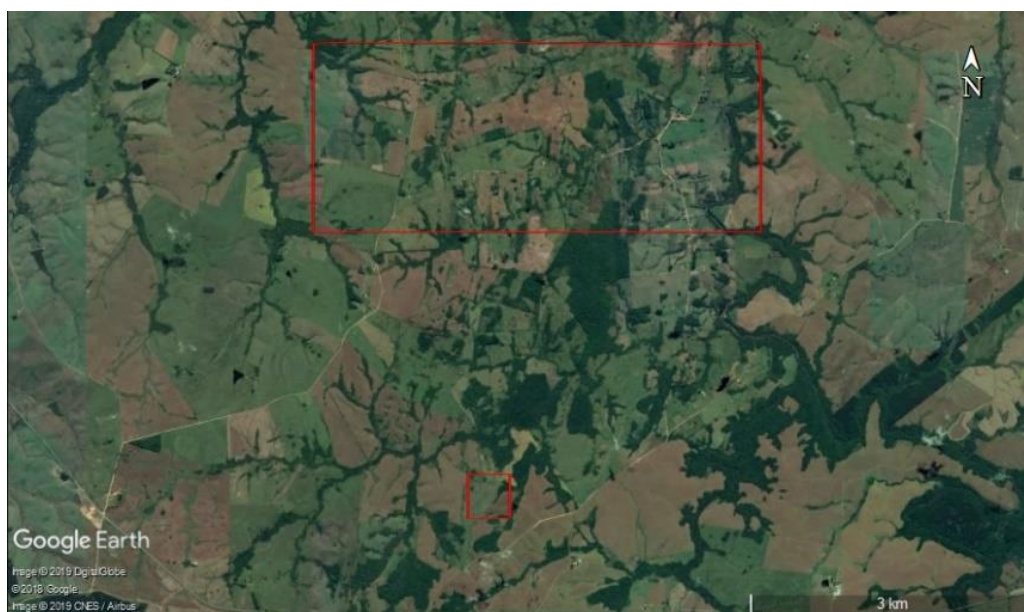
Mantiqueiras, e idade única de  $892 \pm 3$  Ma para Ibaré. Arena et al. (2017a) dataram zircões em cloritito e em turmalinito dos ofiolitos Ibaré e Palma, obtendo a idade de  $726 \pm 2$  Ma para o primeiro e  $722 \pm 3$  para Palma. Arena et al. (2017b) realizaram datação de zircão em rodingito do ofiolito Capané, Grupo Porongos, tendo como resultado idades entre  $793 \pm 0.9$  Ma e  $715 \pm 2.2$ .

Arena et al. (2018) e Hartmann et al. (2019), através de análise isotópica de B em turmalina de turmalinito, puderam atribuir origem oceânica para tais minerais dos metassomatitos de Ibaré e Bossoroca, respectivamente. Hartmann et al. (2019) também obtiveram idade de  $920.4 \pm 9.8$  Ma em zircões inclusos em turmalina. Diversos autores têm lançado mão de estudos de metassomatitos ao redor do mundo, sobretudo no Escudo Árabe-Nubiano, cujos ofiolitos se assemelham temporal e tectonicamente aos brasileiros. Os estudos de rochas metassomáticas têm auxiliado na compreensão da origem e evolução de rochas máficas e ultramáficas no manto e na crosta terrestre.

## CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

### 1.7 ETAPA PRÉ CAMPO

O início do estudo se deu pela delimitação da área de interesse através de análise de imagens de satélite do Google Earth, buscando evidências estruturais e texturais do terreno. Com isso, foi possível a demarcação de transectas, nas quais, comparadas a mapas geológicos publicados, previu-se abrangência territorial suficiente para desenvolver um estudo evolutivo da área.



**Figura 5.** transectas delimitadas das áreas de estudo.

Posteriormente, ocorreu o estudo bibliográfico prévio acerca da geologia regional, local e teórico de rochas ofiolíticas mundiais e as de objeto deste presente estudo. Para tal, foram buscados artigos nacionais e internacionais, teses, dissertações e livros-base.

### 1.8 ETAPA DE CAMPO

Em campo, o estudo iniciou-se com o mapeamento geológico da área estabelecida. Nesta etapa foi possível delimitar com maior precisão contatos geológicos, ocorrências de rochas específicas e as relações entre elas. Concomitantemente foram coletadas amostras-chave, visando potenciais análises de laboratório.

## 1.9 ETAPA PÓS-CAMPO

### Preparação de amostras e mapas geofísicos

Com a posse das amostras selecionadas, a etapa seguinte foi a preparação deste material conforme a demanda de cada análise pretendida. Foram confeccionadas 11 lâminas delgadas, polidas e sem lamínulas, sendo: 1 do diorito Capivaras, Complexo Cambaí (C3P17); 1 de metavulcanoclástica da Formação Campestre (C3P4); 1 de serpentinito (BO3A), 1 de cloritito (BO17), 1 de turmalinito (BO19), 1 de anfibolito (C3P2), 5 de cromita-talco-magnesita granofels (AM1, C4P4, C4P6, BO13 e C3P10), da Formação Arroio Lajeado. Também foram confeccionadas 3 pastilhas de epoxy da amostra de turmalinito (BO19).

Amostras de serpentinito (BO3A, BO3B, BO5 e BO11), diorito (C3P17), metavulcanoclástica (C3P4) e anfibolito (C3P2) foram britadas, moídas e separadas aproximadamente 10 mg para geoquímica de rocha total de elementos maiores, menores e traços. Esta análise foi realizada nos laboratórios Bureau Veritas Commodities Canada Ltd. e SGS Geosol Laboratórios Ltda.



**Figura 6.** Amostras pulverizadas para geoquímica de rocha total e lâminas delgadas.

Todas as preparações de amostras ocorreram nos laboratórios de Preparação e Laminação, Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica, UFRGS.

Os dados de aerogeofísica foram fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM 2010a). Neste trabalho, utilizou-se informações de aerogamaespectrometria e aeromagnetometria. Os dados foram obtidos pela LASA PROSPECÇÕES S.A. (CPRM 2010a). A aquisição se deu por voo em

altitude de 100 m sobre o terreno, com espaçamento de 500 m entre as linhas de aquisição e com linhas de controle a cada 10 km, tendo orientação NS e EW.

Para o levantamento de dados magnéticos pela LASA, foi utilizado o equipamento Scintrex CS-2. Já para informações de raios gama, dois equipamentos em dois aviões distintos foram necessários: os espectrômetros Exploranium GR-820 e Radiation Solutions Inc. RS500. O modelo digital de terreno foi obtido com a utilização dos altímetros de radar King 405 e Collins ALT-50 e os barômetros Fugro/Enviro em diferentes aviões.

O processamento dos dados geofísicos de magnetometria e gamaespectrometria foi feito pela LASA PROSPECÇÕES S.A., no Rio de Janeiro, através do *software* GEOSOFT 2005. Este processamento resultou em mapas de diversas escalas em um banco de dados que foi fornecido à UFRGS pela CPRM de Porto Alegre. Com a utilização do *software* GEOSOFT, as imagens foram processadas e confeccionadas por Jairo F. Savian e Carolina G. Leandro de forma a se restringirem à área do presente estudo.

#### 1.10 OBTENÇÃO DE DADOS

As lâminas delgadas foram descritas e fotografadas, sob luz natural e nicóis cruzados, através dos microscópios Zeiss Scope A1 AX10, Laboratório de Microscopia da UFOP, e Olympus BX51, Instituto de Geociências da UFRGS. Na descrição petrográfica, buscou-se a identificação da assembleia mineralógica de cada rocha, assim como a relação textural entre os cristais, possibilitando a delimitação de campos para posterior análise em microsonda eletrônica.

Dados de química mineral foram obtidos através de análises de microsonda eletrônica (EPMA) do Laboratório de Microanálises do DEGEO/EM/UFOP, sob parâmetros de aceleração 15.0 kV, corrente de feixe de 15 nA e spot size de 5 µm. O padrão analítico utilizado foi o Smithsonian.

Os minerais analisados foram: hornblenda das amostras de anfibolito (C3P2), rocha metavulcanoclástica (C3P4) e diorito (C3P17); turmalina de turmalinito - lâmina delgada e pastilha (BO19); Cr-espinélio e magnetita de cromita-talco-magnesita granofels (BO13, C3P10 e C4P4, representadas por uma lâmina cada); clorita de cloritito (BO17), turmalinito (BO19) e anfibolito (C3P2); plagioclásio de anfibolito (C3P2), rocha metavulcanoclástica (C3P4) e diorito (C3P17); ortoclásio de diorito (C3P17); magnesita de cromita-talco-magnesita granofels (C3P10 e C4P4); serpentinita do granofels (C3P10 e C4P4); clinopiroxênio do diorito (C3P17); prehnita do anfibolito (C3P2); apatita de cloritito (BO17) e turmalinito (BO19), e epidoto do diorito (C3P17).

Associado aos dados de química mineral, imagens de BSE foram obtidas de todas as amostras supracitadas. Também foram elaborados mapas composicionais de campos selecionados em lâminas do anfibolito, turmalinito e cromita-talco-magnesita granofels.

Os resultados de química mineral e geoquímica de rocha total foram processados através do *software* GCDkit 5.0 IN R 3.4.3 para gerar diagramas de classificação mineral e geoquímica, evolução química e metamórfica.

Os resultados foram organizados e interpretados, com submissão de manuscrito ao Brazilian Journal of Geology.

## CAPÍTULO IV – MANUSCRITO DO ARTIGO

Manuscrito submetido ao periódico Brazilian Journal of Geology. E-mail de confirmação de recebimento da submissão do artigo.




---

### Brazilian Journal of Geology - Manuscript ID BJGEO-2019-0120

2 mensagens

**Tatiana Alonso** <onbehalfof@manuscriptcentral.com>

seg, 11 de nov de 2019 às 14:12

Responder para: secretaria@zeppelini.com.br

Para: leo.hartmann@ufrgs.br

Cc: amanda.juliano027@gmail.com, leo.hartmann@ufrgs.br, glauciaqueiroga@yahoo.com.br, carolina.leandro@ufrgs.br, jairo.savian@ufrgs.br, marco\_pcastro@yahoo.com

11-Nov-2019

Dear Dr. Hartmann:

Your manuscript entitled "Mineralogical evolution of metasomatic and associated rocks in northern Bossoroca ophiolite, São Gabriel terrane" has been received by the Editorial Office of the Brazilian Journal of Geology.

Please note that this message is not a confirmation of submission, which will only be given once your manuscript is considered to be within the scope and of interest to the journal.

Your manuscript ID is BJGEO-2019-0120.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to ScholarOne Manuscripts at <https://mc04.manuscriptcentral.com/bjgeo-scielo> and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to <https://mc04.manuscriptcentral.com/bjgeo-scielo>.

Thank you for submitting your manuscript to the Brazilian Journal of Geology.

Sincerely,  
Brazilian Journal of Geology Editorial Office

---

**Léo Afraneo Hartmann** <leo.hartmann@ufrgs.br>

seg, 11 de nov de 2019 às 14:14

Para: Amanda J <amanda.juliano027@gmail.com>

----- Mensagem original -----

**Assunto:**Brazilian Journal of Geology - Manuscript ID BJGEO-2019-0120

**Data:**11-11-2019 16:06

**Remetente:**Tatiana Alonso <onbehalfof@manuscriptcentral.com>

**Para:**leo.hartmann@ufrgs.br

**Cópia:**amanda.juliano027@gmail.com, leo.hartmann@ufrgs.br, glauciaqueiroga@yahoo.com.br, carolina.leandro@ufrgs.br, jairo.savian@ufrgs.br, marco\_pcastro@yahoo.com

**Responder para:**secretaria@zeppelini.com.br

[Texto das mensagens anteriores oculto]

--

---

Léo Afraneo Hartmann  
Professor Emérito  
IGeo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Avenida Bento Gonçalves, 9500  
91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

Telefones: 55-51-33089750 (UFRGS)

55-51-991153018 (Celular, Whatsapp)

E-mail: [leo.hartmann@ufrgs.br](mailto:leo.hartmann@ufrgs.br)

---



***Title: Mineralogical evolution of metasomatic and associated rocks in northern Bossoroca ophiolite, São Gabriel terrane***

*Authors: Amanda Juliano Massuda<sup>1</sup>, Léo Afraneo Hartmann<sup>1\*</sup>, Tiara Cerva-Alves<sup>1</sup>, Gláucia Nascimento Queiroga<sup>2</sup>, Carolina Gonçalves Leandro<sup>1</sup>, Jairo Francisco Savian<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Avenida Bento Gonçalves, 9500; 91500-000 Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil

<sup>2</sup> Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Morro do Cruzeiro, 35400-000 Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil

\* Corresponding author

**Abstract**

Mineralogical evolution of metamorphosed ophiolites is significant to understand paleo-oceanic crust and mantle, and requires multi-proxy techniques to establish reference steps in processes. The Brasiliano Orogen is a large structure of South America; we selected the Bossoroca ophiolite as a prime example of Tonian accretion to island arc. Integration of field geology, aeromagnetometry, aerogamaspectrometry, electron microprobe analyses and compositional maps of minerals led to decoding of oceanic and continental processes. We studied amphibolite, tourmalinite and chromite-talc-magnesite granofels from the ophiolite, Capivaras diorite from the infrastructure and one metavolcanoclastic rock from the Vacacaí superstructure. Analyzed minerals include hornblende, tourmaline, Cr-spinel, magnetite, chlorite, feldspar, magnesite, talc, serpentine, clinopyroxene, prehnite, apatite, and epidote. The ophiolite is highly magnetic and low-K, and is positioned at

the base of superstructure. A magnetic dipole corresponds to the presence of the ophiolite. Hornblende and plagioclase, in addition to widespread olivine + talc in metaserpentinite, position the ophiolite in low-amphibolite facies of regional metamorphism. Granofels originated by carbonatization of serpentinite formed in oceanic crust along with chloritite and tourmalinite. The ophiolite evolved from alteration of oceanic crust and mantle in the Adamastor Ocean to incorporation into island arc.

**KEYWORDS:** *Bossoroca ophiolite; chromite-talc-magnesite granofels; tourmalinite; metasomatism; magnetic dipole.*

## INTRODUCTION

Metasomatic rocks from the oceanic crust and mantle are significant repositories of information on ophiolites and help unravel the evolution of collisional orogens. Hydration of harzburgite generates extensive serpentinite in both mid-ocean ridge and supra-subduction zone environments. The depletion of the residual ultramafic rocks in most elements (e.g., Al, Ti, Ca, Na) leads to formation of metasomatic rocks within and close to the serpentinite, particularly blackwall. Chloritites are characteristic rocks (e.g., Barriga & Fyfe 1983, Dubińska *et al.* 2004, Arena *et al.* 2017), whereas massive and disseminated tourmaline derives from oceanic fumaroles (e.g., Arena *et al.* 2019, Hartmann *et al.* 2019). Carbonation of serpentinite in the oceanic crust leads to generation of chromite-talc-magnesite granofels.

Minerals are repositories of primary information regarding evolution of metamorphosed oceanic crust and mantle. Mantle, oceanic and obduction processes in Tonian ophiolites are comparable to Phanerozoic associations (Stern 2018). Following obduction onto island arcs, ophiolites become sequentially metamorphosed during

protracted accretionary and collisional orogenies. The search for minerals that formed in the oceanic lithosphere prior to metamorphism results in understanding of specific processes.

Extensive (2000 km) exposure of Tonian-Cryogenian crust includes ophiolites in the Arabian-Nubian Shield (Stern 2018), and finds correlation with coeval terranes in South America. The Brasiliano collisional orogen (4000 x 1500 km) is the Neoproterozoic-Cambrian backbone of South America (e.g., Hartmann *et al.* 2001). The orogen is comparable in scale to the Himalayas and formed by similar accretionary to continental collisional processes. Ophiolites are known along the orogen (Suita *et al.* 2004), such as the Araguaia belt in the north (Hodel *et al.* 2019, Barros & Gorayeb 2019, Souza *et al.* 2019), Brasília belt in the center (Strieder & Nilson 1992), Araçuaí Belt in the east (Queiroga *et al.*, 2007), Borborema Province in northeast (Caxito *et al.* 2014, Santos *et al.* 2015) and Dom Feliciano belt in the south (e.g., Arena *et al.* 2016). U-Pb geochronology of metasomatic and igneous zircon from oceanic rocks by Arena *et al.* (2016, 2017, 2018, 2019) and Hartmann *et al.* (2019) reinforced the timing of ophiolite evolution between 920-715 Ma, but significant information remains encoded in metasomatites.

We focused on northern Bossoroca ophiolite, Tonian São Gabriel terrane (e.g., Babinski *et al.* 1996, Lena *et al.* 2014), southern Brazil, because of the presence of metasomatic rocks from the oceanic crust – chromite-talc-magnesite granofels and tourmalinite. Host oceanic island-arc rocks were also studied to establish controls on evolution of the ophiolite – Capivaras diorite (Garavaglia *et al.* 2002) from the Cambaí Complex infrastructure and Campestre Formation metavolcanoclastic rock from the Vacacaí superstructure.

Main techniques included geological, aeromagnetometric and aerogamaspectrometric surveys and electron microprobe analyses of minerals from several rocks, including compositional maps and backscattered electron images of hornblende, tourmaline, Cr-spinel, and whole-rock chemical analyses of serpentinite and chromite-talc-magnesite granofels. Hornblende grew during two events, M1 low-amphibolite facies and M2 prehnite facies, both regional metamorphism. Dravite has composition akin to oceanic tourmaline (e.g., Berryman *et al.* 2016, 2017; Zheng *et al.* 2019). Presence of Cr-spinel in granofels indicates metasomatic derivation of the rock from serpentinite. These are significant constraints on the evolution of metasomatic rocks from the Bossoroca ophiolite as part of Brasiliano Orogen, integrated with accretionary orogens of Gondwana.

## **GEOLOGICAL SETTING**

The Bossoroca ophiolite is a prime Tonian (920-710 Ma; Hartmann *et al.* 2019) association of oceanic crust + mantle rocks in the São Gabriel terrane (100 x 70 km). This juvenile portion of the Dom Feliciano Belt of southern Brazil and Uruguay (Fig. 1) exemplifies the generation of proto-Adamastor Ocean during the early rifting of Rodinia as registered in the present Brazilian Shield (e.g., Basei *et al.* 2018).

The juvenile terrane (Babinski *et al.* 1996, Hartmann *et al.* 2011, Philipp *et al.* 2018) is presently described (Fig. 1) as an association of infrastructure Cambaí Complex granitic and gneissic rocks with superstructure Porongos Group volcanic and volcanoclastic rocks. Oceanic and mantelic rocks form the Cerro do Ouro ophiolite, which contains ophiolites Cerro Mantiqueiras, Ibaré, Palma, Cambaizinho and Bossoroca; Caçapava North and Caçapava South may be additional ophiolites. This tripartite division organizes the stratigraphic relationship in the São Gabriel terrane. Additional ophiolites occur in the Porongos fold-and-thrust belt both in southernmost

Brazil and northeastern Uruguay – Capané (Arena *et al.* 2019), Candiôtinha (Xavier *et al.* 2018), Arroio Grande (Ramos & Koester 2015) and Cerro La Tuna (Peel *et al.* 2018).

Cerro Mantiqueiras and Cambaizinho ophiolites are in the infrastructure of the island-arc, whereas Bossoroca ophiolite was obducted into the base of the superstructure. This geological setting is comparable to the extensive (2000 x 200 km), juvenile Arabian-Nubian Shield (Stern 2018), where gold deposits are found in the ophiolites present in the base of the superstructure. Bossoroca ophiolite has systematic presence of gold specks in alluvium and hosts the exhausted Bossoroca mine in the superstructure 1 km east of the ophiolite.

The tripartite stratigraphic division of the juvenile terrane organizes rock associations in a tectonic framework (Table 1). As pointed out by Hoerlle *et al.* (2019), the terrane is “a Neoproterozoic metavolcanic-sedimentary sequence, represented by the Cambaizinho, Bossoroca and Palma Complexes intruded by juvenile calc-alkaline gneisses of the Cambaí Complex.” The terrane was subdivided into different formations and complexes (*e.g.*, Goñi *et al.* 1962, Koppe *et al.* 1985, Koppe & Hartmann 1990, Machado *et al.* 1990, Babinski *et al.* 1996, Hartmann *et al.* 1999, 2007, 2011, Saalman *et al.* 2006). Our suggestion of nomenclature of the island arc is linked to either plutonic or supracrustal origin of the rocks and is presently expanded to include the extraneous, obducted ophiolite. The profusion of stratigraphic names used in the terrane is thus simplified and organized within a simple, consistent tectonic frame.

The Bossoroca ophiolite in the Campestre village transect (Fig. 2) has many lenses of serpentinite (50-1000 m), amphibolite, banded iron formation and metachert (*e.g.*, Saalman *et al.* 2006, Gubert *et al.* 2016, Hartmann *et al.* 2019). Mantelic rocks are more abundant in the eastern portion and supracrustal rocks in the west, reminiscent

of oceanic mantle to crust tectonic stratigraphy. Foliation strikes NNE and dips at high angle to NNW in rocks displaying dominantly low-amphibolite facies assemblages.

This D2 foliation (Saalman *et al.* 2006, 2007) marks the obduction of the ophiolite into the oceanic island arc. Transcurrent faulting and local thrusting occurred in succession. Older Rio de La Plata Craton rocks are present below The juvenile terrane was thrust over the Rio de la Plata Craton at an undetermined age (possibly 680 Ma), because of isotopic composition of younger São Sepé Granite (550 Ma); a metacraton was recognized in the region (Santos *et al.* 2019). Petrological and isotopic evidence from Ediacaran granites (Remus *et al.* 1999) point to the presence of craton underneath the São Gabriel terrane, and this interpretation was reinforced by a magnetotelluric survey (Bologna *et al.* 2019).

The ophiolite is in contact on the west with deformed granitic rocks of the infrastructure Cambaí Complex. Most rocks show evidence of amphibolite facies metamorphism, including the selected Capivaras diorite. No evidence was observed of thermal metamorphism caused by these granitic rocks on the ophiolite. Study of Capivaras diorite (Garavaglia *et al.* 2002) interpreted the presence of core and rim in hornblende as resulting from magmatic processes.

Superstructure Vacacaí Group (locally Campestre Formation) positioned to the east of the ophiolite is mostly volcanoclastic; rocks were metamorphosed in low amphibolite facies. Strong thermal metamorphism was overprinted on these supracrustal rocks in the northern portion by intrusion of São Sepé Granite.

Metasomatic rocks – chromite-talc-magnesite granofels and tourmalinite – occur close to serpentinite and amphibolite within the ophiolite. The Bossoroca ophiolite is thus a prime rock association to unravel the evolution of Tonian oceanic crust and mantle accreted to a juvenile island arc.

## MATERIALS AND METHODS

Techniques here reported for the airborne geophysical survey of the shield by the Geological Survey of Brazil (CPRM 2010) include aerogammaspectrometry and aeromagnetometry, and follow Hartmann *et al.* (2016). Data acquisition was made by LASA PROSPECÇÕES S.A. (CPRM 2010). The flight was at an elevation of 100 m above the terrain, line spacing at 500 m and control lines spaced 10,000 m oriented NS and EW. The survey covered 159,789.21 km of flights. Border regions of the shield were also covered, including strips of the Paleozoic-Mesozoic Paraná Basin to the north, west and south and the Quaternary coastal plain in the east. A Scintrex CS-2 equipment was used for the acquisition of magnetic data. Two equipments were used in two different airplanes for the acquisition of gamma spectrometric data, the Exploranium GR-820 and the Radiation Solutions Inc./RS500 spectrometers. Radar altimeters King 405 and Collins ALT-50 and barometers Fugro/Enviro were used in different airplanes to obtain the digital terrain model of the shield.

The geophysical magnetic (total magnetic field) and gamma spectrometric (potassium, thorium and uranium channels) data processing was done at LASA PROSPECÇÕES S.A., Rio de Janeiro, involving the application of Oasis Montaj routines, version 7.1.1 (GEOSOFT 2005). Maps were generated in several scales, and also a data bank. This data bank was deposited at UFRGS by the Geological Survey of Brazil office in Porto Alegre; authors produced the maps of digital elevation model, anomalous magnetic field (AMF), total count, eTh and eU. Selected maps are interpreted and presented. This remote sensing of rock types and lineaments allowed the contouring of the geology and interpretation of structures.

Observation of satellite images was integrated with aerogeophysical data, followed by geological field survey in a 2-km wide EW Vila Campestre transect of the

Bossoroca ophiolite. The survey involved collection of rock samples for laboratory studies, including a new occurrence of massive tourmalinite. Studied samples from the ophiolite include tourmalinite and associated chloritite, chromite-talc-magnesite granofels, serpentinite, amphibolite, and one sample from the Capivaras diorite in the host Cambaí Complex. Polished thin sections were studied under the optical microscope at Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Electron microprobe analyses (EPMA) were made at 'Laboratório de Microanálises do DEGEO/EM/UFOP – Laboratório integrante da Rede de Microscopia e Microanálises de Minas Gerais – FAPEMIG'. Several minerals were analyzed, as follows: hornblende (several crystals, n = 101 analyses) from samples C3P2 (amphibolite), C3P4 (metavolcanoclastic rock), C3P17 (deformed diorite); tourmaline (n = 18 crystals, n = 79 analyses) from sample BO19; Cr-spinel and magnetite (n = 14 crystals, 62 analyses) from samples BO17 – chloritite (1 sample), BO13 (1 sample), C3P10 (1 sample) and C4P4 (1 sample) – chromite-talc-magnesite granofels; chlorite (n = 85 analyses) from samples BO17 (chloritite), BO19 (tourmalinite) and C3P2 (amphibolite); plagioclase (several crystals, 61 analyses) in 1 sample each of C3P2 (amphibolite), C3P4 (metavolcanoclastic rock), C3P17 (deformed diorite); orthoclase (n = 2 crystals, n = 6 analyses) from sample C3P17 (deformed diorite); magnesite (n = 8 crystals, 22 analyses) from 2 samples (C3P10, C4P4) of chromite-talc-magnesite granofels; talc (n = 4 analyses) from sample C3P10 – chromite-talc-magnesite granofels; serpentine (n = 18 analyses) from granofels samples C3P10, C4P4; clinopyroxene (n = 7 analyses from deformed diorite sample sample C3P17, prehnite (n = 3 analyses) from amphibolite sample C3P2, apatite (n = 12 analyses) from granofels samples BO19 and BO17, and epidote (n = 7 analyses) from deformed diorite sample C3P17.



Back-scattered electron (BSE) and compositional maps were also obtained. BSE images (n = 33) were made of samples C3P2 (amphibolite), BO19 (tourmalinite), BO17 (chloritite), BO13, C3P10, C4P4 (chromite-talc-magnesite granofels), C3P17 (deformed diorite), and C3P4 (metavolcanoclastic rock). Along with BSE images, compositional maps were made of several minerals in amphibolite (C3P2; Al, Ca, Fe, Mg, Ti), tourmalinite with chlorite (BO19; Al, Ca, Fe, Mg, Na, Si, Ti), and Cr-spinel (BO13 sample; Mg, Al, Cr, Ni, Fe). Mineral abbreviations follow Whitney & Evans (2010).

Photomicrographs were taken under the petrographic microscope in plane-polarized and crossed-nicols of amphibolite (C3P2), chlorite tourmalinite (BO19), chromite-talc-magnesite granofels (C3P10), deformed diorite (C3P17), and metavolcanoclastic rock (C3P4). BSE images cover the same area in thin-section registered in photomicrography.

## RESULTS

Satellite images show wooded hill tops in parts of the ophiolite, surrounded by dominant undulated grasslands and farmland (Fig. 3). Anomalous magnetic field reveals the presence of several dipoles, one located across the ophiolite (Fig. 4a). The ophiolite has low total count of K% + eTh + eU (Fig. 4b, c, d). Cambaí Complex infrastructure and Vacacaí Group superstructure have higher emission rates of aerogammaspectrometry than the ophiolite, highest peak in post-tectonic São Sepé, Cerro da Cria and Ramada Granites. Digital elevation model (Fig. 5) displays ophiolite at the distal rim of Ramada plateau at 200 m elevation.

Field survey led to identification of chromite-talc-magnesite granofels (Fig. 6a), bare rock exposed along 300 x 50 m in the forested hill top. Rock is massive, grey colored, medium grained, with a few Cr-spinel seams; granofels dips steeply to NNW.

The granofels is in contact with serpentinite and near amphibolite. In addition, massive tourmalinite and dispersed tourmaline occur associated with chloritite (Fig. 6b).

Photomicrography of amphibolite (Fig. 7) shows assemblage of green hornblende and plagioclase. Both minerals were altered to blue-green hornblende and low-Ca plagioclase marking M1 and M2. The quantitative compositional map of an area 600 x 500  $\mu\text{m}$  selected in the amphibolite (Fig. 8) displays varied zoning in several minerals. Hornblende is seen in crystals 50-300  $\mu\text{m}$  large, displaying core, mantle and rim. All zones have similar Ca content, but Al, Fe, Ti are low in the mantle, whereas Mg is high in the rim. Ti is higher in the core than in the rim. Hornblende zoning is barely visible in BSE images (Fig. 8f, 9b).

Tourmaline zoning (Fig. 9c, d, 10) is irregular from core to rim and displays increase in Ca, Fe, Al, Na and BSE in narrow rims. Al, Mg, Si show little zoning, whereas Ti increases in rims. Associated chlorite shows diffuse zoning, with decrease in Fe along rims, in direct contact with tourmaline rim enriched in Fe.

Cr-spinel cores are homogeneous, but rims and fractures are strongly altered to magnetite (Fig. 11). Chlorite (Fig. 10, 11) occurs in variable sizes (20-500  $\mu\text{m}$ ) and contents of Al, Mg and Ti. Prehnite (Fig. 8) is located at the contact of chlorite and plagioclase with patchy contact with plagioclase and some fine protrusions into chlorite. Prehnite forms fine-grained mat with plagioclase and chlorite (arrow in Fig. 8f). Small (5-100  $\mu\text{m}$  long) titanite crystals are numerous and display high Ti.

Optical and BSE images of same thin section of amphibolite C3P2 and other rock samples are displayed in Figure 9 – (a, b) amphibolite, (c, d) tourmalinite with chlorite, (e, f) deformed diorite, (g, h, i) chromite-talc-magnesite granofels, and (j, k, l) metavolcanoclastic rock. In (a), elongated, ragged hornblende shows pleochroism in green to bluish green (ng) and light brown (np); plagioclase is unzoned and mostly

interspersed with hornblende; opaque mineral is present. In (c), unzoned, light yellowish grey tourmaline is associated with light green chlorite. Image (e) shows mineral association of hornblende, clinopyroxene, plagioclase and titanite. Images (g, h) document the association of Cr-spinel, talc, magnesite, serpentine. In (j), hornblende displays light brown core and bluish green rim, homogeneous but cloudy plagioclase; in (k), plagioclase is twinned and large (200  $\mu\text{m}$ ) and small (5-10  $\mu\text{m}$ ) quartz crystals are present.

Chemical analyses of several minerals were made by EPMA in different rocks (examples in Figs. 8h, 9, 10, 11). Tables with analytical results are in Supplementary Files.

All analyzed amphibole is hornblende (one analysis in deformed diorite is actinolite), composition variable within and among rock samples (Fig. 12). In the amphibolite, hornblende is strongly zoned from tschermakite to magnesiohornblende. Hbl2 occurs either as mantle between core and apparent rim of Hbl1 or as diffuse and irregular alteration portions anywhere within Hbl1, and also as homogeneous small crystals. Magnesiohornblende from the metavolcanoclastic rock has variable compositions in two different fields. Magnesiohornblende from the deformed diorite is homogeneous in Si but has variable Mg# (Fig. 13).

Tourmaline is dravite (Fig. 14a, b); zoning seen in compositional images corresponds to wide homogeneous cores that have narrow rims enriched in Ca, Fe, Na and Ti. As a result, BSE images of rims are brighter gray than cores. Chlorite is lower Fe in contact with tourmaline. Minor minerals included in tourmaline are apatite (100-200  $\mu\text{m}$ ) and ilmenite (100  $\mu\text{m}$ ). Few fractures present in tourmaline are filled with chlorite. Tourmaline is known to form in the oceanic realm (Slack et al. 1998, van Hinsberg *et al.* 2011).

Cr-spinel (Fig. 15) is picotite, chromite and magnetite. Chlorite is clinocllore in chloritite, but ripidolite in amphibolite and tourmalinite (Fig. 16). Feldspar is mostly plagioclase but orthoclase (no twinning observed) is also present (Fig. 17). Amphibolite has variable plagioclase from andesine to oligoclase and albite. Oligoclase is dominant and orthoclase abundant in deformed diorite. Nearly all compositions are andesine in metavolcanoclastic rock.

Serpentinite displays common jackstraw texture illustrating the lower amphibolite facies mineral association olivine + talc + chlorite (Hartmann *et al.* 1987), superposed by significant serpentinization. Chromite-talc-magnesite granofels (Supplementary Table 15) has low SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; high Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni support origin from altered serpentinite.

## DISCUSSION

Multiproxy evaluation of Bossoroca ophiolite in the Campestre traverse resulted in advanced knowledge of field relationships and mineralogy of metasomatic and associated rocks. Aeromagnetometry and aerogamaspectrometry of the studied ophiolite led to a better definition of rock distribution in the environment of oceanic island-arc. The association with serpentinite and occurrence of serpentine and chromite in the granofels testify to the origin from altered serpentinite of depleted mantle geochemistry. Granofels is associated with listvenite (contains additionally green mica and quartz) in comparable terrains, and is known to contain significant gold deposits in the Arabian-Nubian Shield (NE Africa).

Two metamorphic events occurred in the ophiolite, because of the structure and composition of hornblende and variable composition of plagioclase of amphibolite. In the ophiolite, the two events occurred under similar P,T conditions. Tschermakite was the first hornblende (Hb11) to crystallize during metamorphism M1, succeeded by

magnesium hornblende (Hbl2) during M2. Hbl2 formed by extensive recrystallization of Hbl1 in different positions of the crystals. Ti in hornblende can be used as an indicator of metamorphic facies. Ti = 0.5-1.0 apfu is characteristic of hornblende formed in lower amphibolite facies (Raase 1974, Holland & Richardson 1979), e.g., Bossoroca ophiolite.

The infrastructure Capivaras diorite has magmatic hornblende in the cores and metamorphic hornblende in the rims. A volcanoclastic rock from the superstructure Campestre Formation has two comparable hornblende compositions in cores and rims. The association olivine + talc in metaserpentinite indicates lower amphibolite facies metamorphism, in agreement with the grade of metamorphism of the infrastructure deformed diorite and superstructure metavolcanoclastic rock. This metamorphic event M1 occurred during obduction of Bossoroca ophiolite onto an oceanic island arc.

In amphibolite, prehnite stabilization was achieved by Ca availability in host titanite. Longer (50  $\mu\text{m}$ ) and wider (5  $\mu\text{m}$ ) titanite crystals are apparent in BSE image (Fig. 8f); shorter (<50  $\mu\text{m}$ ) and narrower (<5  $\mu\text{m}$ ) crystals only show in Ti image. Titanite formed within prehnite crystals during reaction of chlorite with andesine-oligoclase, obtaining Ti, Mg, Fe from chlorite and Ca, Al from andesine-oligoclase. Ca is more mobile and moved from plagioclase into the altered chlorite crystal to form titanite; in totally altered chlorite, titanite contained within prehnite is larger than titanite enclosed in altered chlorite.

Chromite composition is compatible with lower amphibolite facies metamorphism. The presently described tourmalinite is similar to rocks described by Hartmann *et al.* (2019) and Arena *et al.* (2019), because of assemblage with clinocllore and dravite composition. Metamorphosed tourmaline is common in amphibolite facies

rocks (Henry & Dutrow 1996). These rocks are interpreted as formed in oceanic crust fumaroles.

The Bossoroça ophiolite has in the northern part metasomatic rocks formed in the ocean floor, constraining early juvenile evolution of Brasiliano Orogen in lower amphibolite facies conditions of obduction onto an island arc.

## **CONCLUSIONS**

Significant volume of metasomatic rocks – chromite-talc-magnesite granofels, tourmalinite, serpentinite – are reported in the northern part of the Bossoroça ophiolite. Two intense metamorphic events occurred in the amphibolite facies both in the ophiolite and in the host rocks of infrastructure Cambaí Complex and superstructure Campestre Formation. Integrated field survey, aeromagnetometry and aerogamaspectrometry with mineral studies – electron microprobe analyses and compositional maps, in addition to back-scattered electron images – led to description of processes in the key Bossoroça ophiolite of the Brasiliano Orogen.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

We acknowledge support in the field by Mariana Werle and Vítor Casagrande Dias. Amanda J. Massuda thanks Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brazilian Government for MS scholarship. This study led to Master of Science degree of Amanda with Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Léo A. Hartmann has received systematic financial support, research scholarship and grant from CNPq.

## **REFERENCES**

- Abdel-Karim A.-A.M. & El-Shafei S.A. 2018. Mineralogy and chemical aspects of some ophiolitic metaultramafics, central Eastern Desert, Egypt: Evidences from chromites, sulphides and gangues. *Geological Journal*, **53**:580-599.
- Arena K.R., Hartmann L.A., Lana C. 2016. Evolution of Neoproterozoic ophiolites from the southern Brasiliano Orogen revealed by zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry. *Precambrian Research*, **285**:299-314.
- Arena K.R., Hartmann L.A., Lana C. 2017. Tonian emplacement of ophiolites in the southern Brasiliano Orogen delimited by U-Pb-Hf isotopes of zircon from metasomatites. *Gondwana Research*, **49**:296-332.
- Arena K.R., Hartmann L.A., Lana C. 2018. U-Pb-Hf isotopes and trace elements of metasomatic zircon delimit the evolution of the neoproterozoic Capané ophiolite in the southern Brasiliano Orogen. *International Geology Review*, **60**:911-928.
- Arena K.R., Hartmann L.A., Lana C., Queiroga G.N., Castro M.P. 2019. Geochemistry and  $\delta^{11}\text{B}$  evolution of massive tourmaline from the Tonian Ibaré ophiolite, southern Brasiliano Orogen. *Annals Brazilian Academy of Sciences* (accepted for publication).
- Babinski M., Chemale Jr. F, Hartmann L.A., Van Schmus W.R., Silva L.C. 1996. Juvenile accretion at 750-700 Ma in southern Brazil. *Geology*, **24**:439-442.
- Barriga F. & Fyfe W.S. 1983. Development of rodingite in basaltic rocks in serpentinites, East Liguria, Italy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **84**:146–151.
- Barros, L.D., Gorayeb, P.S.S. 2019. Serra do Tapa Ophiolite Suite - Araguaia Belt: Geological characterization and Neoproterozoic evolution (central-northern Brazil). *Journal of South American Earth Sciences* (on Internet).
- Basei M.A.S., Frimmel H.E., Campos Neto M.C., Ganade de Araujo C.E., Castro N.A., Passarelli C.R. 2018. The Tectonic History of the Southern Adamastor Ocean Based

- on a Correlation of the Kaoko and Dom Feliciano Belts. *In: Siegesmund S. et al.* (eds.), *Geology of Southwest Gondwana, Regional Geology Reviews*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, p. 63-85.
- Berryman E.J., Kutzschbach M., Trumbull R.B., Meixner A., van Hinsberg V., Kasemann S.A., Franz G. 2017. Tourmaline as a petrogenetic indicator in the Pfitsch Formation, Western Tauern Window, Eastern Alps. *Lithos*, **284–285**:138–155.
- Berryman E.J., Wunder B., Rhede D., Schettler G., Franz G., Heinrich W. 2016. P–T–X controls on Ca and Na distribution between Mg–Al tourmaline and fluid. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **171**:1-14.
- Bologna M.S., Dragone G.N., Muzio R., Peel E., Nuñez-Demarco P., Ussami N. 2019. Electrical structure of the lithosphere from Rio de la Plata Craton to Paraná Basin: Amalgamation of cratonic and refertilized lithospheres in SW Gondwanaland. *Tectonics*, **38**:77-94.
- Boynton W.V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In Henderson, P., ed. *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, p. 63–114.
- Caxito, F., Uhlein, A., Stevenson, R., Uhlein, G.J. 2014. Neoproterozoic oceanic crust remnants in northeast Brazil. *Geology*, **42**:387-390.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2010. Projeto Aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul. LASA PROSPECÇÕES S.A., Technical report, 260 p.
- Dubińska E., Bylina P., Kozłowski A., Dörr W., Nejbert K., Schastok J., Kulicki C. 2004. U-Pb dating of serpentization - hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland). *Chemical Geology*, **203**:183–203.
- Garavaglia L., Bitencourt M.F., Nardi L.V.S. 2002. Cumulatic diorites related to post-collisional, Brasiliano Pan-African mafic magmatism in the Vila Nova Belt, southern Brazil. *Gondwana Research*, **5**:519-534.



- Goñi, J.C., Goso, H., Issler, R.S. 1962. Estratigrafia e geologia economica do Pré-Cambriano e Eo-Paleozóico Uruguaio e Sul-Riograndense. *Avulso da Escola de Geologia da UFRGS*, **3**:1-105.
- Gubert M.L., Philipp R.P., Basei M.A.S. 2016. The Bossoroca Complex, São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil. U-Pb geochronology and tectonic implications for the neoproterozoic São Gabriel Arc. *Journal of South American Earth Sciences*, **70**:1–17.
- Hartmann L.A., Chemale Jr. F., Philipp R.P. 2007. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Iannuzzi R. & Frantz J.C. (Eds.). 50 anos de Geologia. Porto Alegre: Instituto de Geociências, p. 97-123.
- Hartmann L.A. & Delgado I.M. 2001. Cratons and orogenic belts of the Brazilian Shield and their contained gold deposits. *Mineralium Deposita*, **36**:207–217.
- Hartmann L.A., Lopes W.R., Savian J.F. 2016. Integrated evaluation of the geology, aerogammaspectrometry and aeromagnetometry of the Sul-Riograndense Shield, southernmost Brazil. *International Geology Review*, **88**:75–92.
- Hartmann L.A., Nardi L.V.S., Formoso M.L.L., Remus M.V.D., Lima E.F., Mexias A.S. 1999. Magmatism and metallogeny in the crustal evolution of Rio Grande do Sul shield, Brazil. *Pesquisas*, **26**:45-63.
- Hartmann L.A., Philipp R.P., Santos J.O.S., McNaughton N.J. 2011. Time frame of 753-680 Ma juvenile accretion during the São Gabriel orogeny, southern Brazil. *Gondwana Research*, **19**:84–99.
- Hartmann L.A., Remus, M.V.D., Koppe J.C. 1987. Distincao entre textura spinifex e arranjos de olivina metamorfica. *Revista Brasileira de Geociências*, **17**:302-305.

- Hartmann L.A., Werle M., Michelin C.R.L., Lana C., Queiroga G.N., Castro M.P., Arena K.R. 2019. Proto-Adamastor ocean crust (920 Ma) described in Brasiliano Orogen from coetaneous zircon and tourmaline. *Geoscience Frontiers*, **10**:1623-1633.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D. 2012. IMA report. Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, **97**:2031-2048.
- Henry D.J. & Dutrow B.L. 1996. Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. *Reviews in Mineralogy*, **33**:503-557.
- Hey M.H. 1954. A new review of the chlorite. *Mineralogy Magazine*, **30**, 227 p.
- Hoerlle G.S., Remus M.V.D., Dani N., Gomes M.E.B., Ronchi L.H. 2019. Evolution of fluorite-mica-feldspar veins: Evidences of a fossil geothermal system in the São Gabriel terrane and consequences for Pb-Zn-Cu metallogeny. *Journal of South American Earth Sciences*, **92**:209-221.
- Holland T.J.B. & Richardson S.W. 1979. Amphibole zonation in metabasites as a guide to the evolution of metamorphic conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **70**:143-148.
- Koppe J.C., Hartmann L.A., Lisboa P.F.C., Monteiro R.N. 1985. Aspectos geológicos e estratigráficos do Complexo Bossoroca, São Sepé, Rio Grande do Sul. In: Simp. Sul-Brasil. Geol., vol. 2. SBG, Anais, Florianópolis, Brasil, pp. 32-36.
- Koppe J.C. & Hartmann L.A. 1990. Geochemistry of the Bossoroca greenstone belt. Southernmost Brazil. *Geochimica Brasiliensis*, **2**:167-174.
- Lena L.O.F., Pimentel M.M., Philipp R.P., Armstrong R., Sato K. 2014. The evolution of the Neoproterozoic São Gabriel juvenile terrane, southern Brazil based on high spatial resolution U-Pb ages and <sup>18</sup>O data from detrital zircons. *Precambrian Research*, **247**:126–138.

- Machado N., Koppe J.C., Hartmann L.A. 1990. A Late Proterozoic U-Pb age for the Bossoroca Belt, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **3**:87-90.
- Peel E., Bettucci L.S., Basei M.A.S. 2018. Geology and geochronology of Paso del Dragón Complex (northeastern Uruguay): Implications on the evolution of the Dom Feliciano Belt (Western Gondwana). *Journal of South American Earth Sciences*, **85**:250-262.
- Philipp R.P., Pimentel M.M., Basei M.A.S. 2018. The Tectonic Evolution of the São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil: The Closure of the Charrua Ocean. In: Siegesmund S. *et al.* (eds.), *Geology of Southwest Gondwana, Regional Geology Reviews*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, p. 243-265.
- Queiroga G.N., Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Alkmim F.F., Pimentel M.M., Dantas E., Martins M., Castañeda C., Suita M.T.F., Prichard F. 2007. Age of the Ribeirão da Folha ophiolite, Araçuaí Orogen: The U-Pb zircon dating of a plagiogranite. *Geonomos*, **15**:61–65.
- Raase P. 1974. Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **45**:231-236.
- Ramos R.C. & Koester E. 2015. Litho-geochemistry of the meta-igneous units from Arroio Grande Ophiolitic Complex, southernmost Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **45**:65-78.
- Remus M.V.D. 1990. Evolução geológica do Complexo Cambaizinho. MS dissertation, UFRGS, Porto Alegre.

- Remus M.V.D., McNaughton N.J., Hartmann L.A., Koppe J.C., Fletcher I.R., Groves D.I., Pinto V.M. 1999. Gold in the Neoproterozoic juvenile Bossoroca volcanic arc of southernmost Brazil: Isotopic constraints on timing and sources. *Journal of South American Earth Sciences*, **12**:349–366.
- Saalmann K., Remus M.V.D., Hartmann L.A. 2006. Tectonic evolution of the Neoproterozoic São Gabriel block, southern Brazil: constraints on Brasiliano orogenic evolution of the Rio de La Plata cratonic margin. *Journal of South American Earth Sciences*, **21**:204–227.
- Saalmann K., Remus M.V.D., Hartmann L.A. 2007. Neoproterozoic magmatic arc assembly in the southern Brazilian Shield – constraints for a plate tectonic model for the Brasiliano orogeny. *Geotectonic Research*, **95**:41-59.
- Santos J.O.S., Chernicoff C.J., Zappettini E.O., McNaughton N.J., Hartmann L.A. 2019. Large geographic and temporal extensions of the Río de La Plata Craton, South America, and its metacratonic eastern margin. *International Geology Review*, **61**:56-85.
- Santos, T.J.S., Amaral, W.D.S., Ancelmi, M.F., Pitarello, M.Z., Fuck, R.A., Dantas, E.L. 2015. U-Pb age of the coesite-bearing eclogite from NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for western Gondwana assembly. *Gondwana Research*, **28**:1183-1196.
- Slack J.F., Turner R.J.W., Ware P.L.G. 1998. Boron-rich mud volcanoes of the Black Sea region: Modern analogues to ancient sea-floor tourmalinites associated with Sullivan-type Pb-Zn deposits? *Geology*, **26**
- Souza C.S.M., Hauser N., Dantas E.L., Reimold U., Schmitt R.T., Chaves J.G.S., Osorio L.F.B. 2019. Does the metavolcanic-sedimentary Rio do Coco Group, Araguaia Belt, Brazil, represent a continuity of the Quatipuru ophiolitic complex? –

- Constraints from U-Pb and Sm-Nd isotope data. *Journal of South American Earth Sciences* (On Internet).
- Stern R.J. 2018. Neoproterozoic formation and evolution of Eastern Desert continental crust – The importance of the infrastructure-superstructure transition. *Journal of African Earth Sciences*, **146**:15-27.
- Strieder A.J. & Nilson A.A. 1992. Estudo petrológico de alguns fragmentos tectônicos da mélange ofiolítica em Abadiânia (GO): 1 – O protólito dos corpos de serpentinito. *Revista Brasileira de Geociências*, **22**:338-352.
- Suita M.T.F., Pedrosa-Soares A.C., Leite C.A.S., Nilson A.A., Prichard H.M. 2004. Complexos ofiolíticos do Brasil e a metalogenia comparada das faixas Araçuaí e Brasília. In: Pereira E.S., Castroviejo R., Ortiz F. (Eds.) *Complejos ofiolíticos em Ibero América*. Edita Proyecto XIII.1, Madrid-España. 379, p. 101–132.
- van Hinsberg V.J., Henry D.J., Marschall H.R. 2011. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *Canadian Mineralogist*, **49**:1–16.
- Whitney D.L. & Evans B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**:185–187.
- Xavier K.F., Oshiro Y., Pinto V.M., Hartmann L.A. 2018. Evolução do ofiolito Candiôtinha, extremo sul do Escudo Brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, *Proceedings... SBG*, 1 p.
- Zenk M. & Schulz B. 2004. Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland. *Mineralogical Magazine*, **68**:769-786.
- Zheng Z., Chen Y.-J., Deng X.-H., Yue S.-W., Chen H.-J., Wang Q.-F. 2019. Tourmaline geochemistry and boron isotopic variations as a guide to fluid evolution in the Qiman Tagh W–Sn belt, East Kunlun, China. *Geoscience Frontiers*, **10**:569-580.

### Figure captions

Figure 1. Geological map of São Gabriel terrane (Hartmann *et al.* 2019) displaying two geotectonic environments of ophiolites – intrusive either into the infrastructure Cambaí Complex (ophiolites numbered 1, 4, 6) or at the base of the superstructure Porongos Group (numbered 2, 3, 5). Inset shows location of Figure 1. Position of Figure 2 indicated.

Figure 2. Geological map of Bossoroca ophiolite (modified from Saalman *et al.* 2006, Gubert *et al.* 2016). Position of ophiolite at the base of the superstructure (top of infrastructure) displayed. Position of Figures 3a, 5, 6 indicated.

Figure 3. Satellite images of studied region northern Bossoroca ophiolite, Campestre transect. Location of studied samples indicated with red dot and number.

Figure 4. Aerogeophysical maps of ophiolite and neighboring region. (a) Aeromagnetometric map - anomalous magnetic field; dipole position marked. Aerogamaspectrometric map – (b) total count, (c) eTh, (d) eU. Position of ophiolite indicated in (b).

Figure 5. Digital elevation model. Ophiolite occupies low-lying hills. ‘Ophiolite’ in same position as Figure 5b.

Figure 6. Field photos. (a) Chromite-talc-magnesite granofels; view to south; rock dips 70° NNW; sample BO13 collected from this outcrop; (b) Tourmalinite sample BO19, showing tourmaline and chlorite.

Figure 7. Photomicrographs of amphibolite, sample C3P2. Position of Figure 8 indicated. (a) Plane-polarized light and (b) crossed nicols.

Figure 8. Characteristic X-ray maps and BSE image of amphibolite within ophiolite, sample C3P2. Position of EPMA analytical spots indicated in (f).

Figure 9. (a) Optical (plane-polarized light) and (b) BSE image of amphibolite, sample C3P2. (c) Optical (plane-polarized light) and (d) BSE image of tourmalinite, sample BO19, displaying tourmaline and chlorite; (e) Optical (plane-polarized light) and (f) BSE image of Capivaras deformed diorite, sample C3P17; (g) Optical (plane-polarized light), (h) optical (crossed nicols) and (i) BSE image of chromite-talc-magnesite granofels located in Figure 3c, sample C3P10; (j) Optical (plane-polarized light), (k) Optical (crossed nicols) and (l) BSE image of metavolcanoclastic rock from Campestre Formation, sample C3P4. Points analyzed by EPMA located in BSE images (b, d, f, i, l).

Figure 10. Characteristic X-ray maps and BSE image of tourmaline, tourmalinite, sample BO19 (mount 2). Two zones are cores poor in Ca, Fe, Ti and low in BSE and rims enriched in Ca, Fe, Ti and brighter in BSE. Chlorite poorer in Fe in core than rim of filled fracture. Position of EPMA analytical spots indicated in (h).

Figure 11. Characteristic X-ray maps and BSE image of chromite, chromite-talc-magnesite granofels, sample BO13. Large, homogeneous chromite core portions crossed and margined by magnetite.

Figure 12. Chemical classification diagram of hornblende (based on Hawthorne *et al.* 2012) from three studied samples. Compositional fields of published hornblende compositions from São Gabriel terrane also shown. A few tschermakite analyses plot above the 2.0 apfu limit and are plotted over the line. M1 and M2 metamorphic events marked from core (c) and rim (r) of crystals. Core (c) and rim (r) of crystals from one amphibolite sample from Remus (1990) (Cambaizinho ophiolite) indicated.

Figure 13. Chemical classification diagram of hornblende from sample C3P17 (deformed diorite) compared with compositions of Capivaras diorite from Garavaglia *et al.* (2002).

Figure 14. Chemical classification diagrams of tourmaline, tourmalinite sample BO19.

Tourmaline A from Hartmann *et al.* (2019) occurs within same studied area.

Figure 15. Chemical classification diagram of Cr-spinel from Bossoroça ophiolite.

Compositional fields of metamorphosed spinel shown (modified from Abdel-Karim *et al.* 2018). Composition of minerals indicated.

Figure 16. Chemical classification diagram of chlorite (based on Hey 1954). Rip. =

ripidolite, Clc = clinocllore, Pyc. = picnochlorite, Sher. = sheridinite.

Figure 17. Chemical classification diagram of feldspar. Main compositional fields marked in grey ellipses.

Figure 18. Chemical composition of hornblende ( $Al^{IV}$ ) vs Ti (apfu) from three studied samples in Zenk & Schulz (2004) diagram, indicating medium pressure metamorphic conditions; M1 in Campestre Formation is suggestive of lower pressure. Published hornblende compositions from São Gabriel terrane also shown. Core (c) and rim (r) of crystals from one amphibolite sample from Remus (1990) (Cambaizinho ophiolite) indicated.

Figure 19. REE diagram of studied serpentinite samples (Boynton 1984) suggestive of similarity with mantle, abyssal peridotite.



## TABLES

Table 1. Stratigraphy of São Gabriel terrane (São Gabriel island arc + obducted ophiolites) and associated units, with selected examples and approximate ages.

Geotectonics	Stratigraphic unit	Description	Age, Ma
Intraplate	Paraná Basin	Voluminous siltite, some lamite, conglomerate, limestone	450-60
Post-orogenic	São Sepé, Ramada, São Manoel, Lavras Granites	Shallow level, strong contact aureole	600-550
Foreland	Camaquã Basin	Volcanics, trachyandesite, sedimentary rocks	575
São Gabriel island-arc	Superstructure, Vacacaí Group – Campestre, Pontas do Salso, Bela Vista, Passo Feio (in part) Formations	Island-arc volcanics and sediments, turbidite, graywacke, tuff, andesite	755
	Infrastructure, Cambaí Complex – Lagoa da Meia-Lua Suite, Sanga do Jobim granite, Cerca de Pedra granodiorite, Capivaras diorite, Imbicuí gneiss	Granitic rocks, syntectonic, no contact metamorphism on ophiolites or Vacacaí Group.	(770), 730-700, 690
Oceanic crust + mantle	Cerro do Ouro Ophiolite: Ophiolites Cerro Mantiqueiras, Cambaizinho, Palma, Ibaré, portions of Passo Feio	Ultramafic, mafic, andesitic, volcanosedimentary rocks.	920-720
	Bossoroca ophiolite (Arroio Lajeado Formation)	Steeply dipping foliation, NNE direction, WNW dip. Talc-olivine metaserpentinite, amphibolite, BIF, gabbro-harzburgite. Metasomatites – Chromite-talc-magnesite fels, tourmalinite, rodingite, chloritite. Obducted at base of suprastructure. Gold specks in alluvium.	920-720

Table 2. Selected electron microprobe analyses (wt.%) of minerals from northern Bossorooca ophiolite. Samples – C3P2, amphibolite; C3P4, metavolcanoclastic rock; BO19, tourmalinite; BO13, chromite-talc-magnesite granofels; C3P10, chromite-talc-magnesite granofels; BO17, chloritite; C4P4, chromite-talc-magnesite granofels; C3P17, deformed diorite.

Mineral	Hbl		Tur	Chr		Chl		Pl		Mgs	Tlc	Di
Sample	C3P2	C3P4	BO19	BO13	C3P10	BO19	BO17	C3P2	C3P4	C4P4	C3P10	C3P17
Analysis	10	4	20	9	21	11	18	70	38	28	34	14
SiO <sub>2</sub>	42.48	48.48	36.24	0.00	0.00	26.54	30.82	60.39	59.10	0.15	62.09	52.98
TiO <sub>2</sub>	0.19	1.18	0.54	0.13	0.07	0.02	0.06	0.00	0.00	0.01	0.01	0.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.90	6.70	31.56	6.23	19.03	21.58	19.54	23.88	25.62	0.47	0.17	0.80
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.05	0.00	56.32	43.23	0.02	0.74	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07
FeO	15.24	12.76	7.06	33.59	32.75	18.06	6.19	0.87	0.09	6.54	1.66	7.09
MgO	10.30	14.24	8.82	2.33	3.02	19.44	30.54	0.68	0.00	39.89	30.38	13.83
CaO	10.61	12.80	0.68	0.00	0.07	0.01	0.02	5.22	7.59	0.33	0.00	23.39
MnO	0.23	0.23	0.04	0.00	0.00	0.24	0.05	0.00	0.01	0.17	0.00	0.30
Na <sub>2</sub> O	1.96	0.77	2.22	0.12	0.21	0.00	0.02	8.09	7.48	0.02	0.07	0.45
K <sub>2</sub> O	0.24	0.24	0.01	0.09	0.08	0.04	0.00	0.11	0.04	0.03	0.07	0.02
F	0.05	0.07	0.05	0.83	0.83	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00
Cl	0.02	0.09	0.00	0.07	0.05	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02	0.04	0.01
Total	97.23	97.61	87.22	99.71	99.34	85.96	87.99	99.29	99.97	47.64	94.51	99.00

## FIGURES

Figure 1

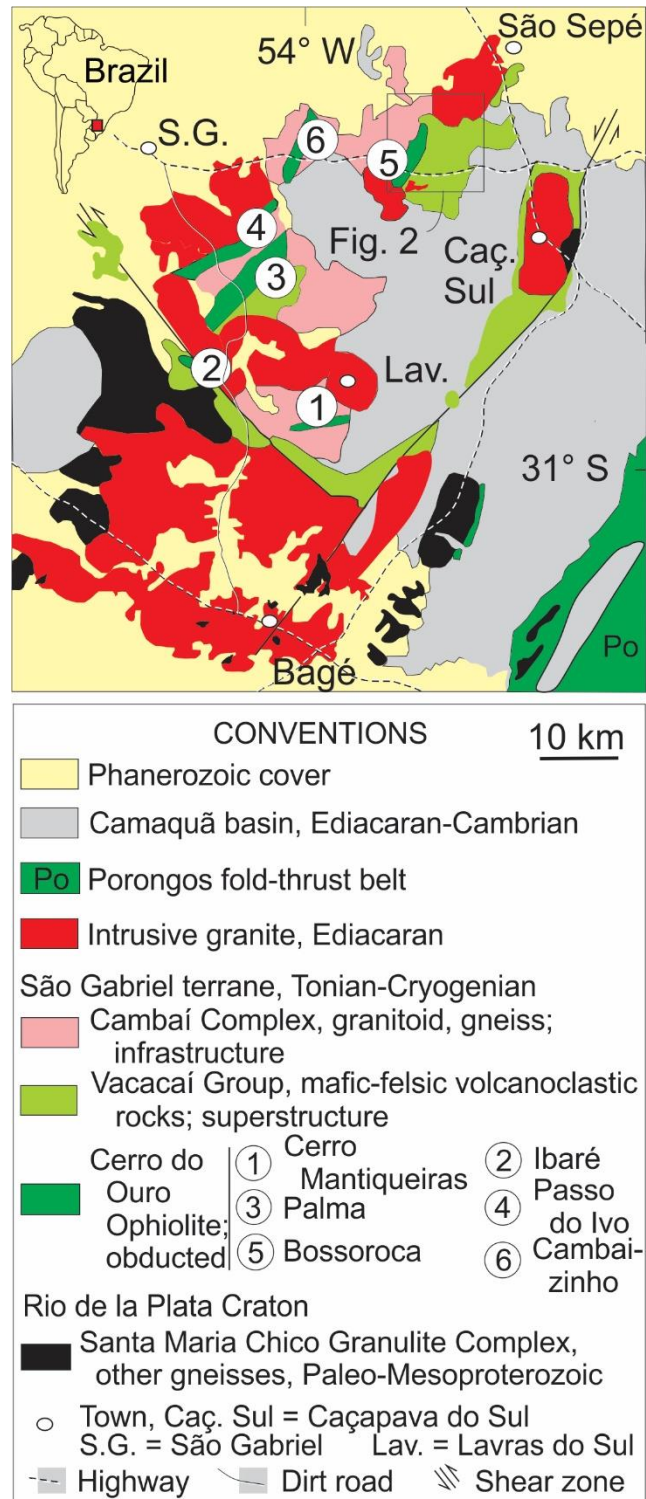


Figure 2

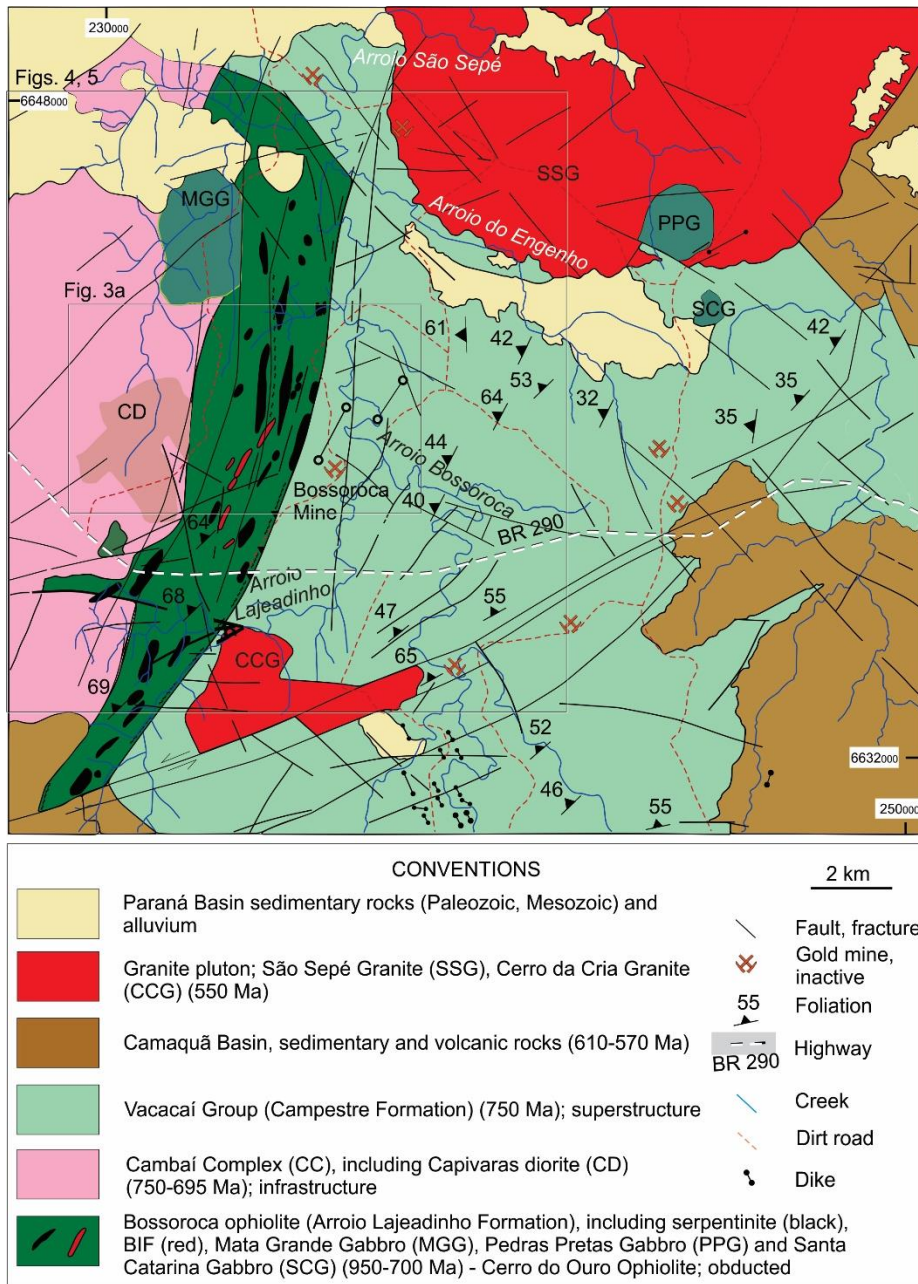


Figure 3

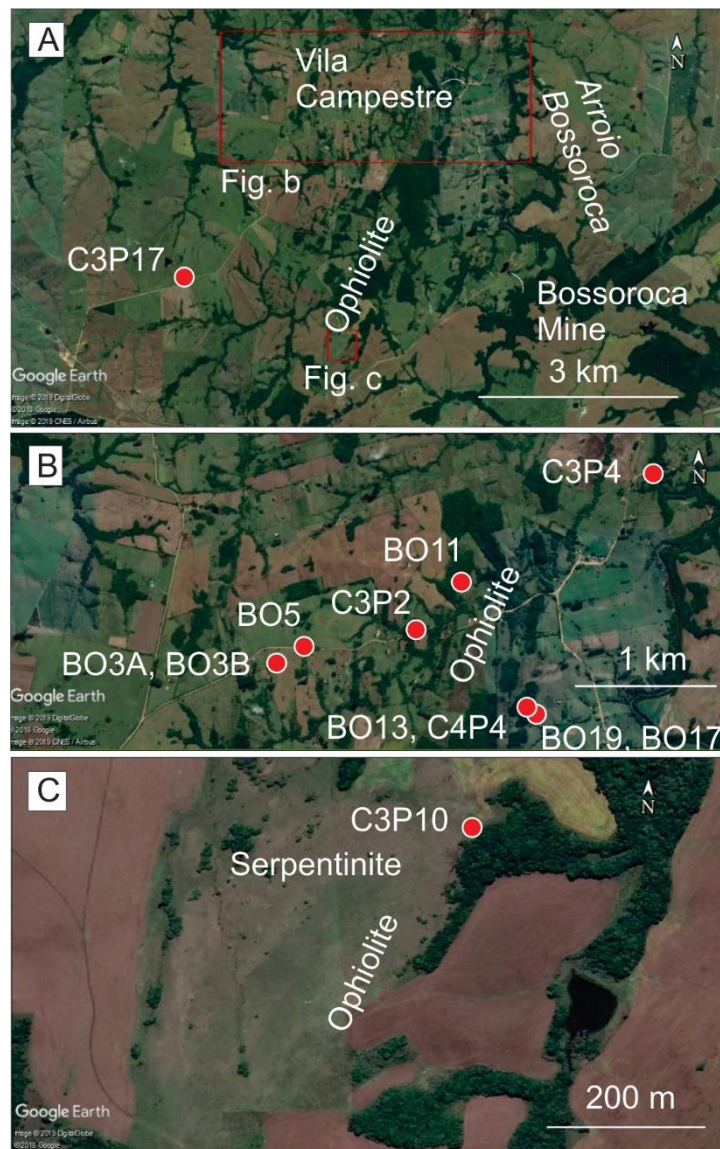


Figure 4

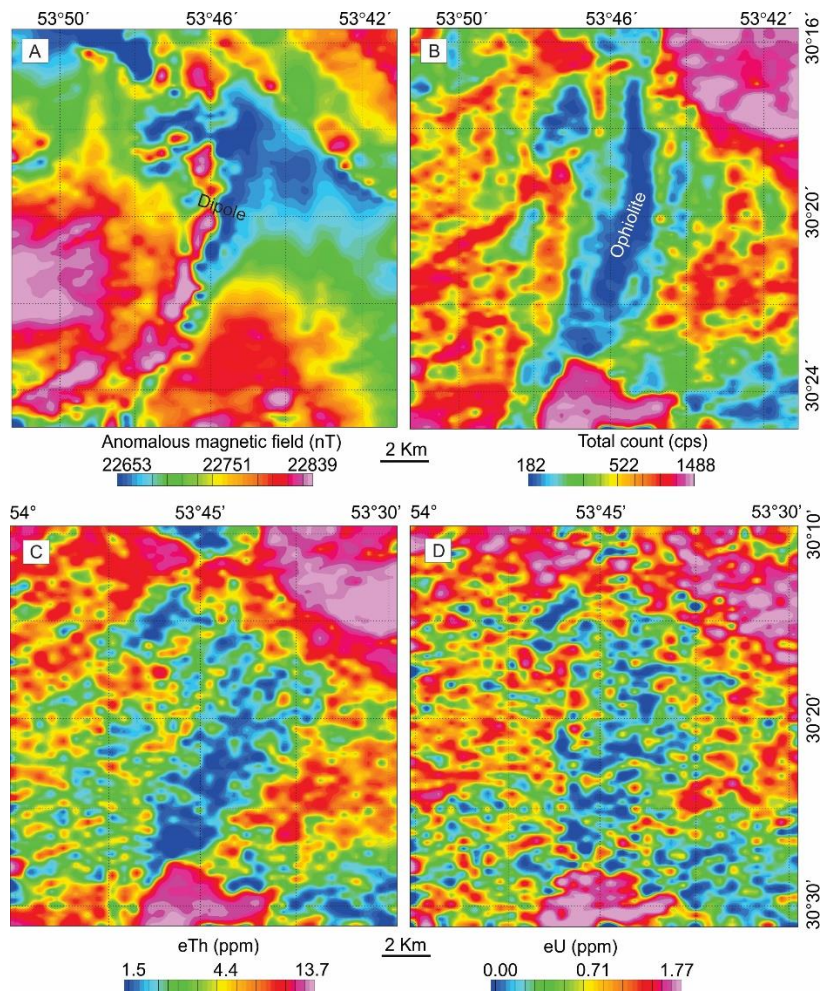


Figure 5

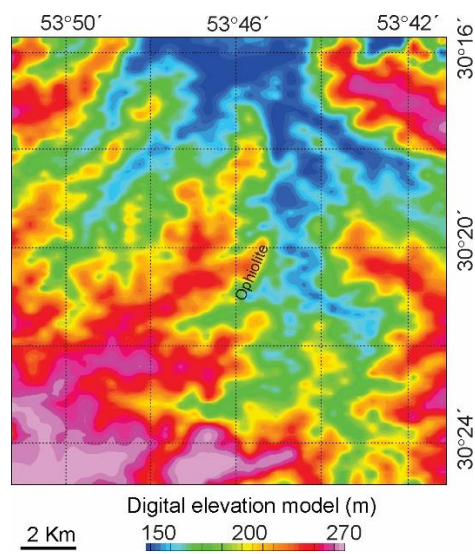


Figure 6

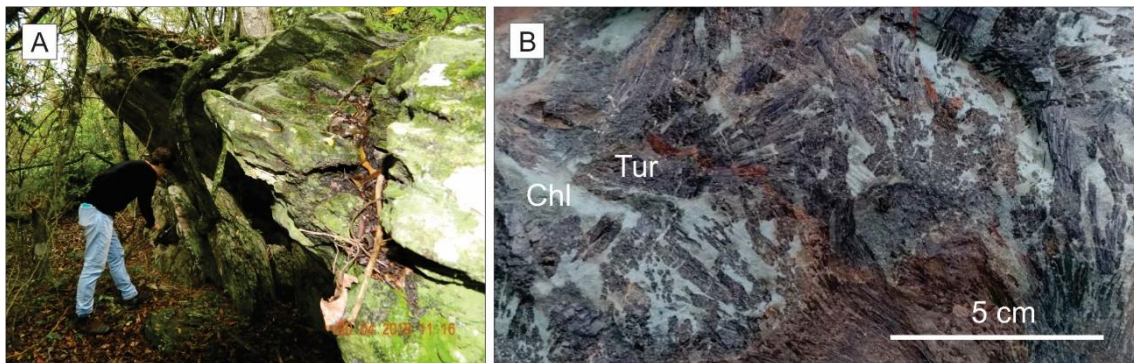


Figure 7

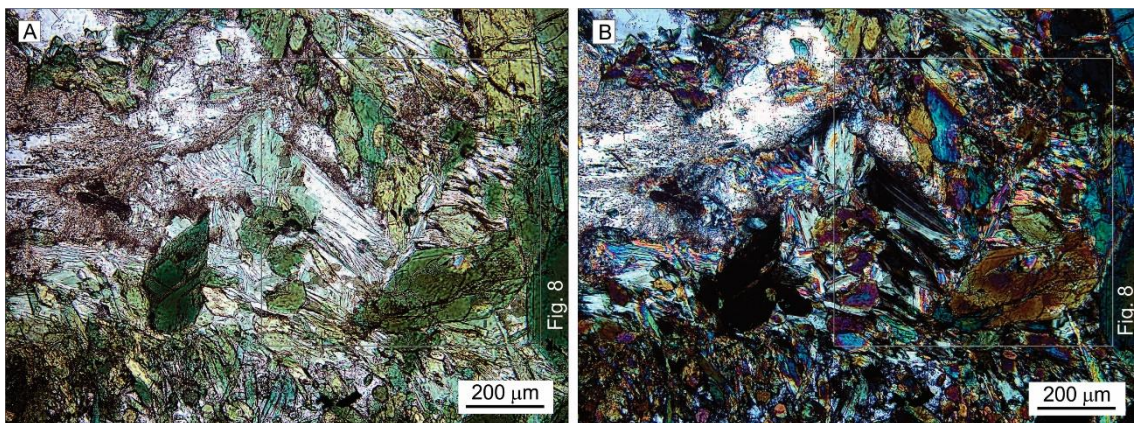


Figure 8

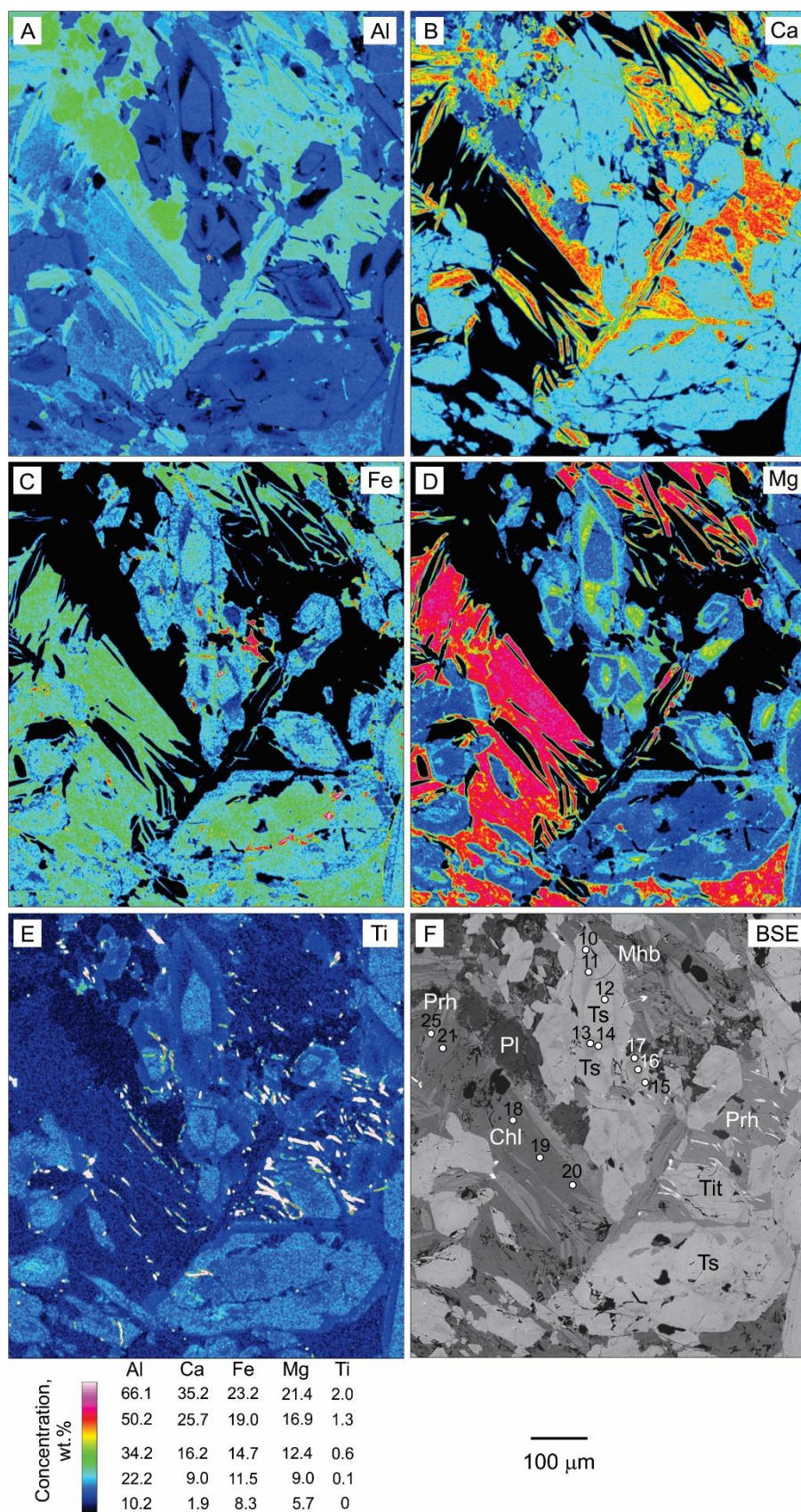




Figure 9

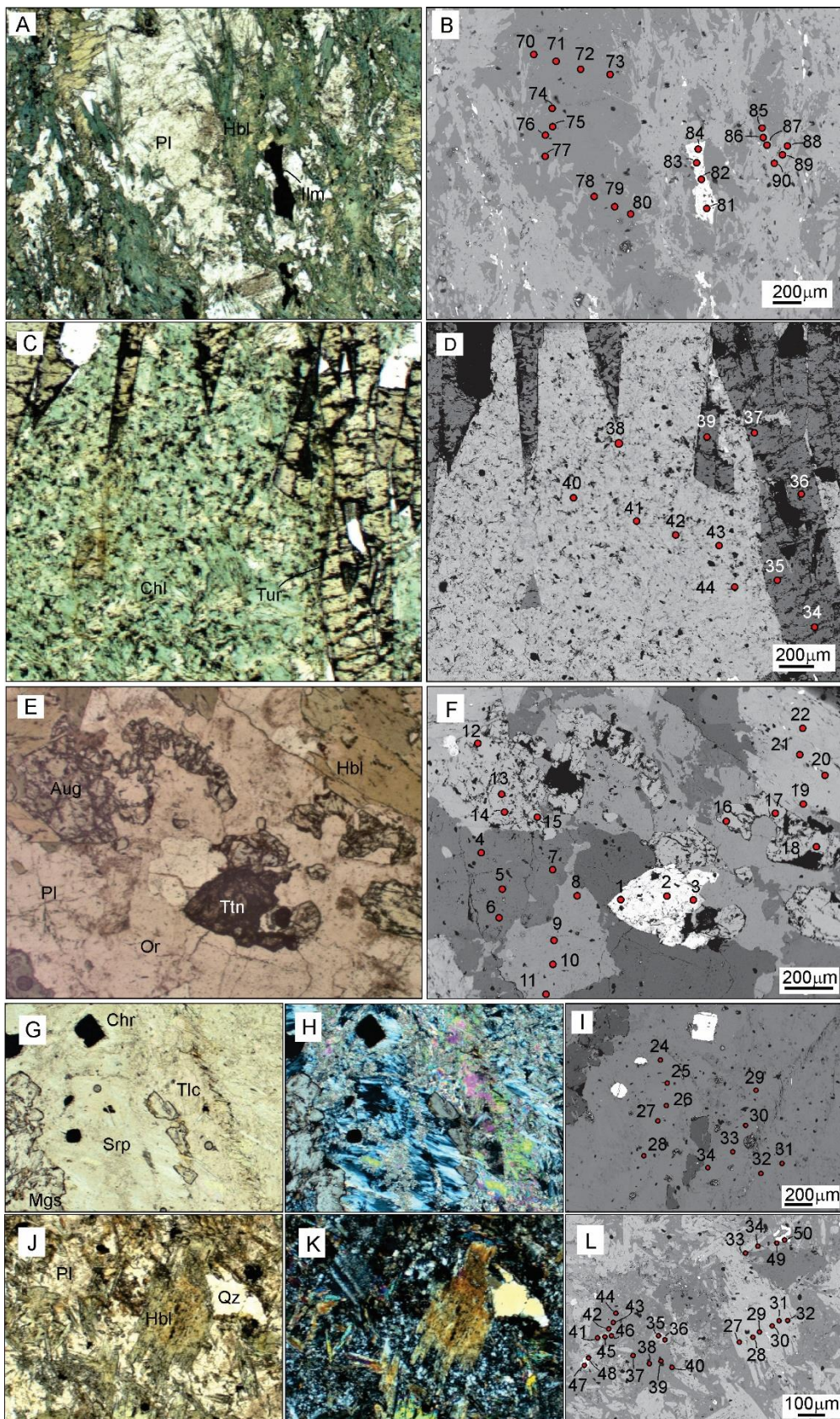


Figure 10

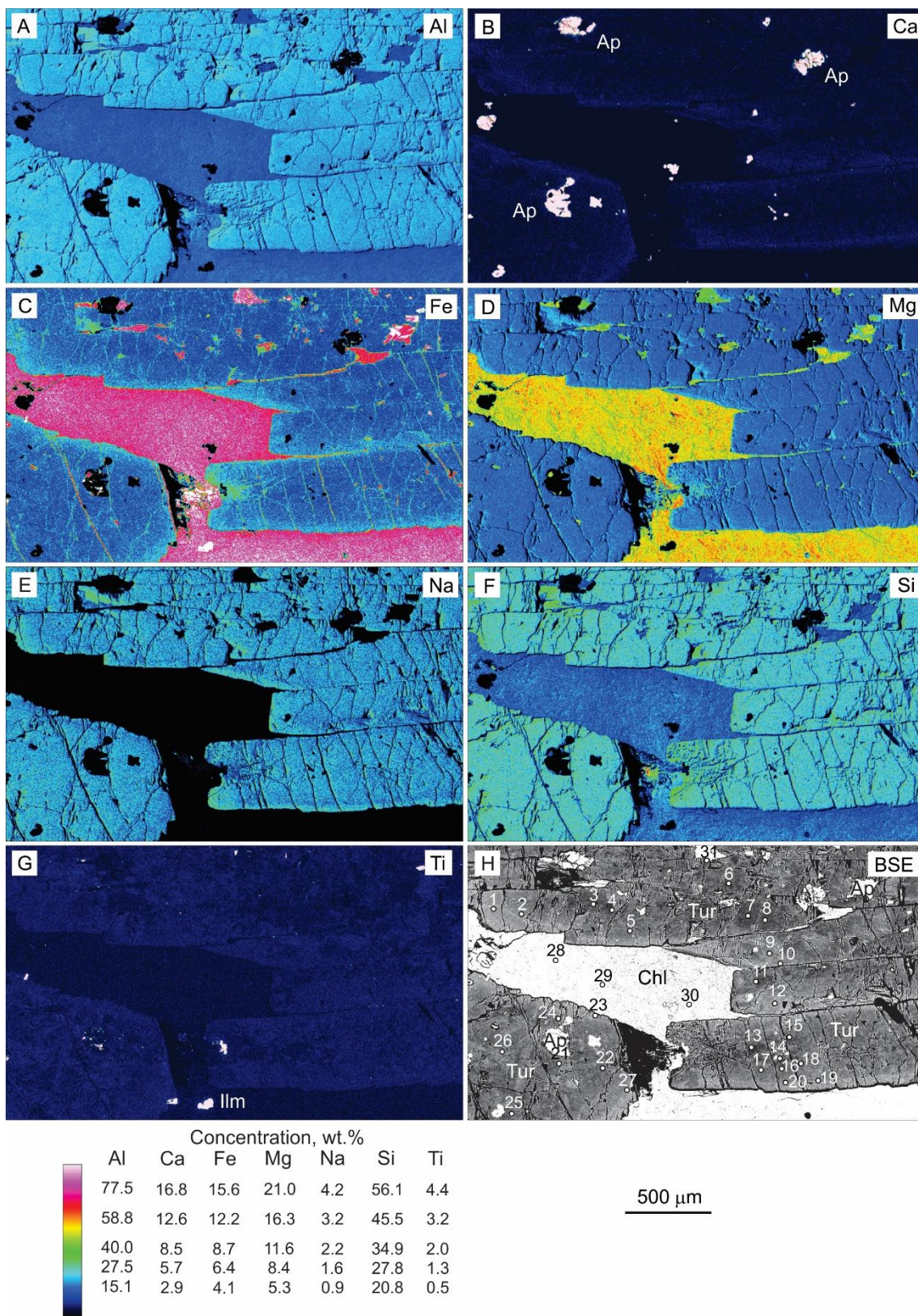


Figure 11

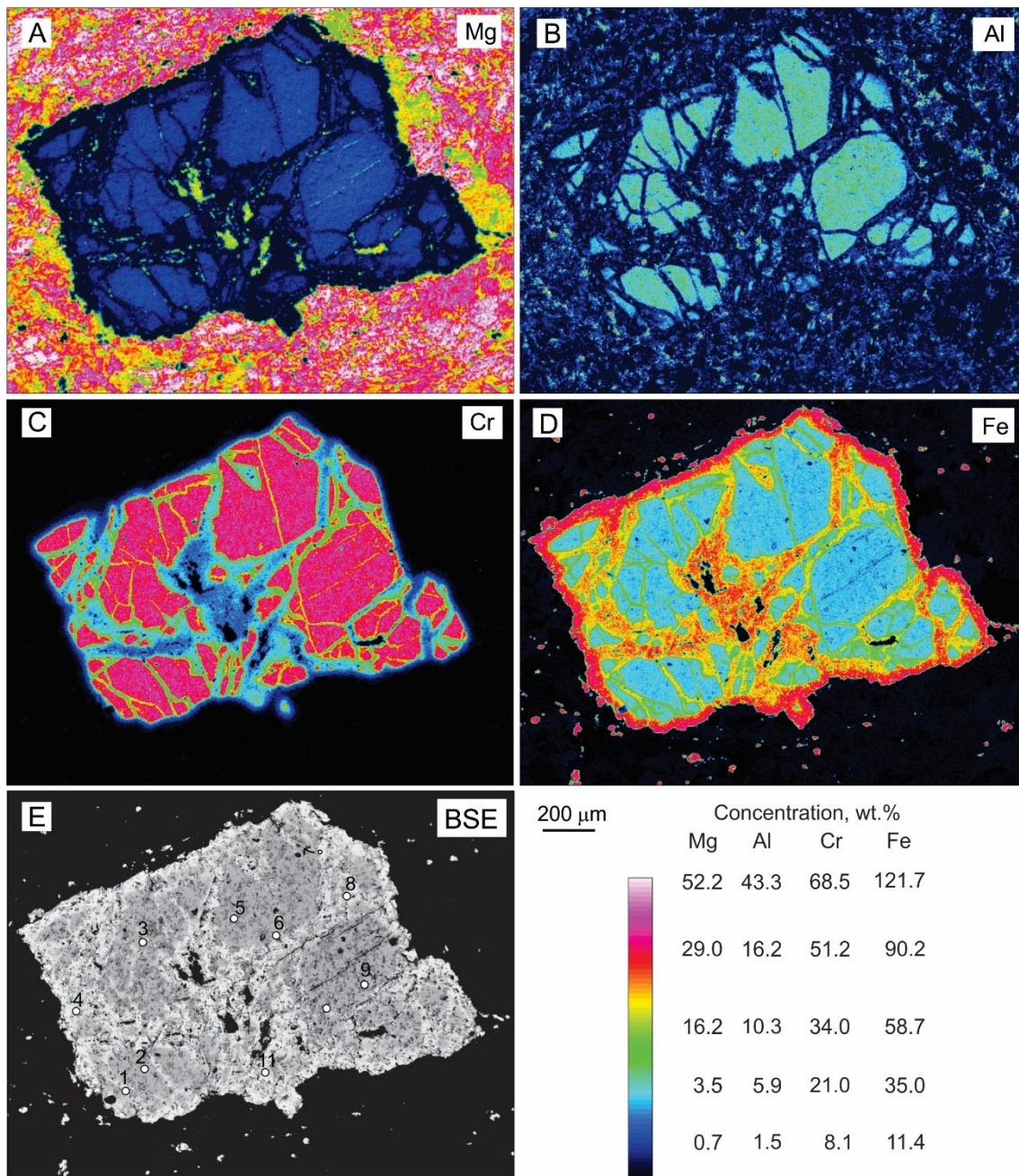


Figure 12

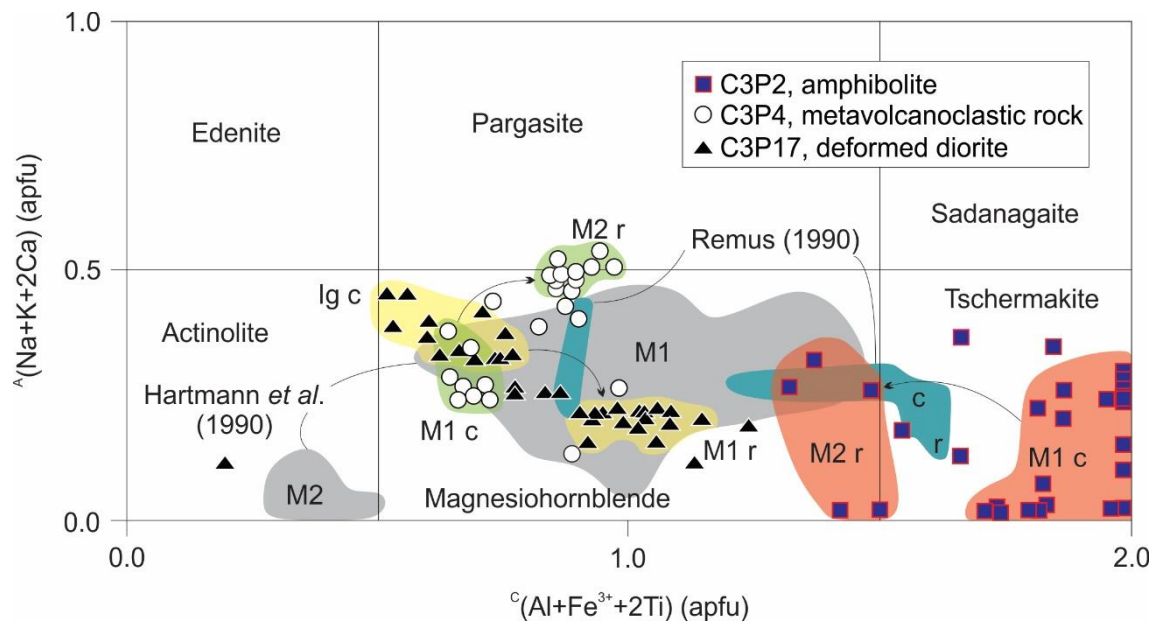


Figure 13

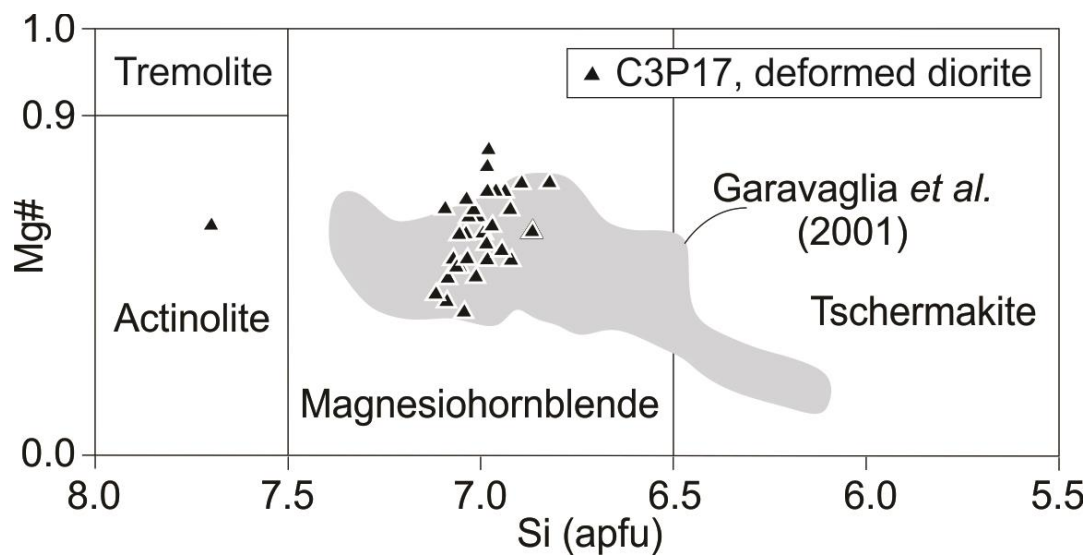


Figure 14

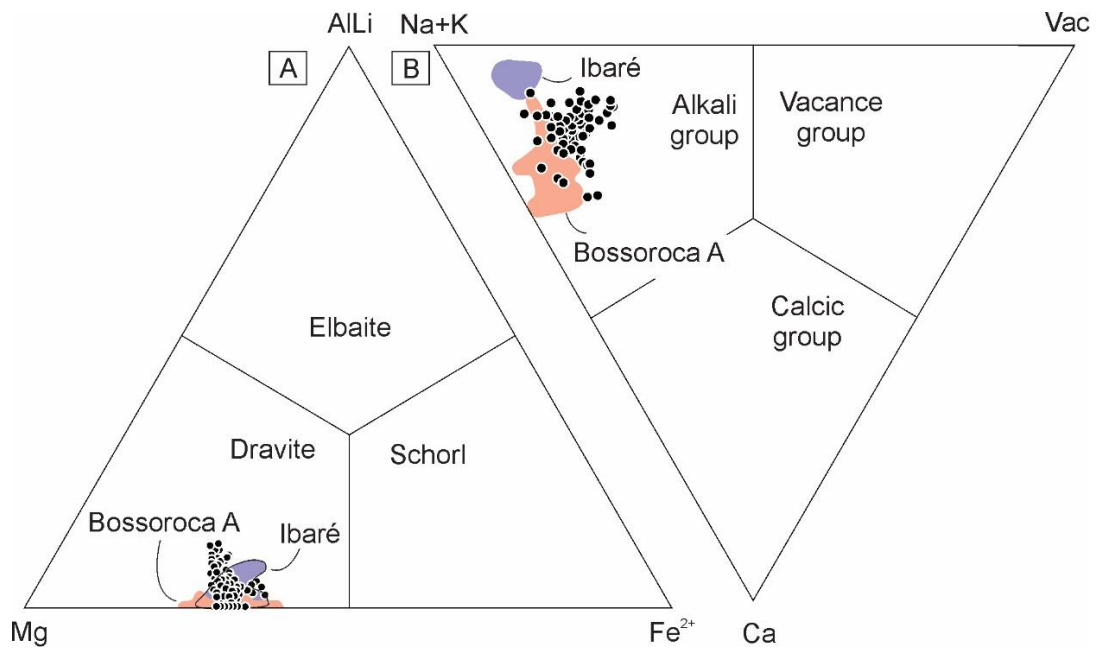


Figure 15

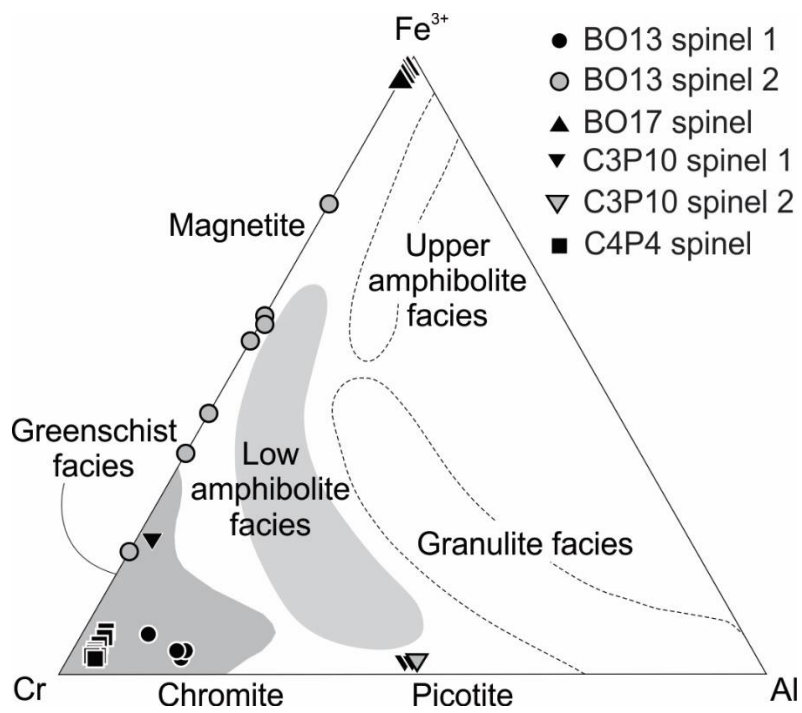


Figure 16

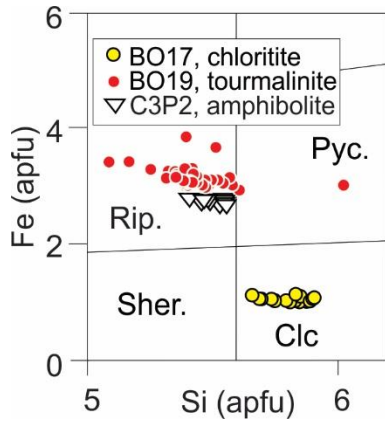


Figure 17

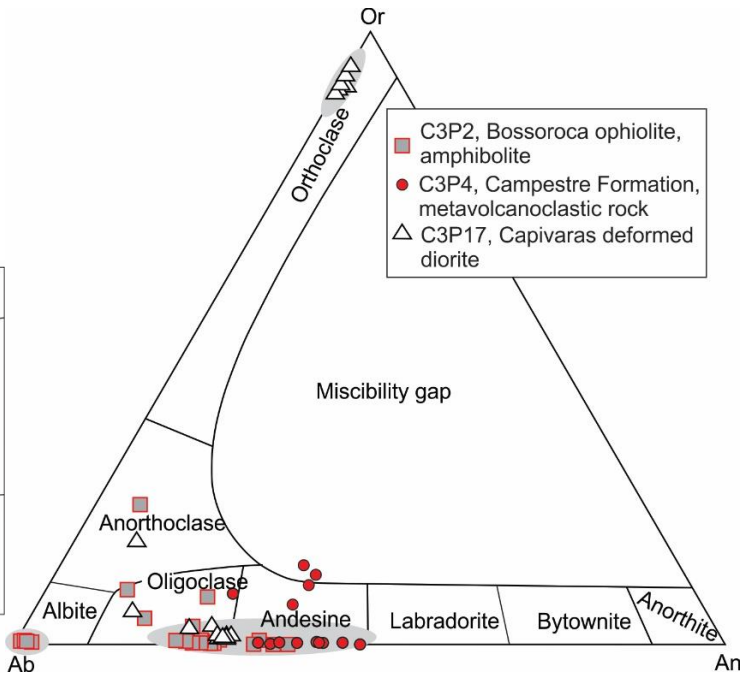


Figure 18

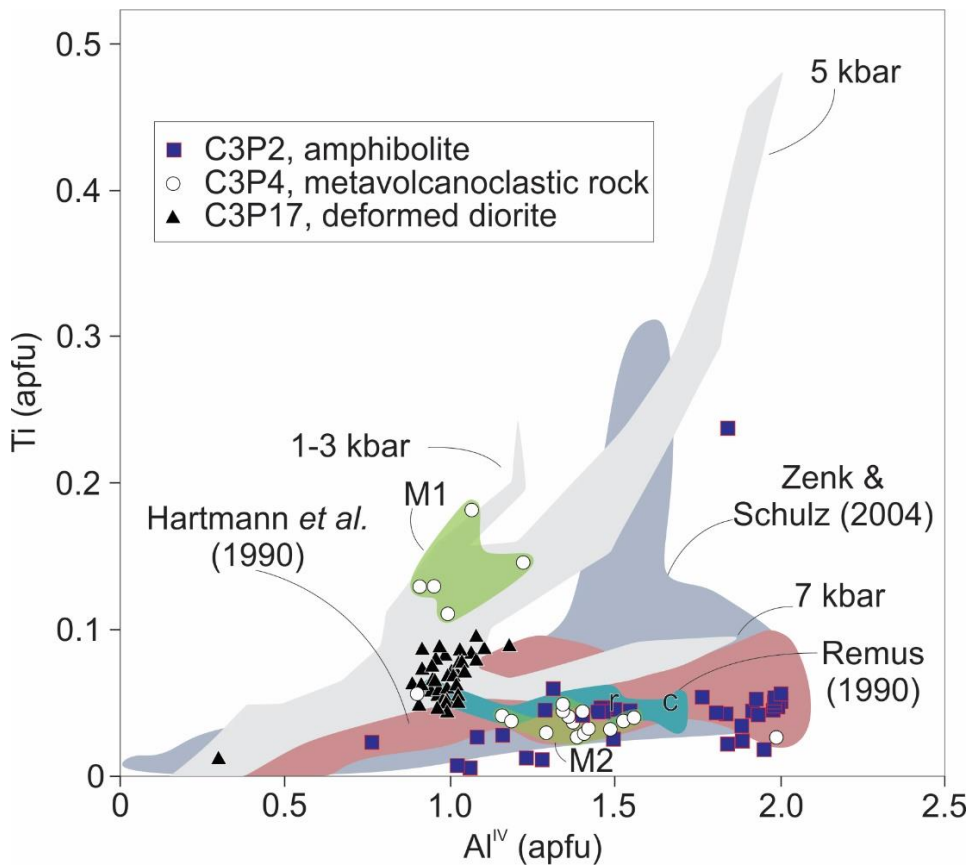
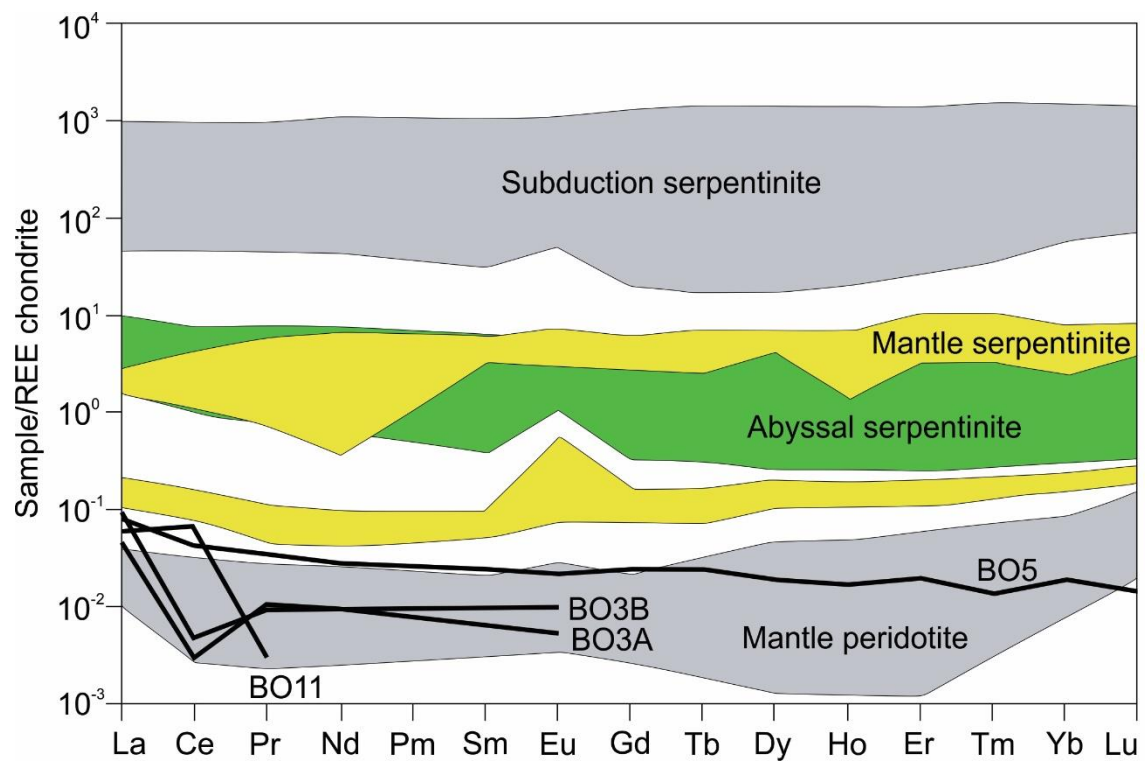


Figure 19



## CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através de análises de química mineral por microsonda eletrônica, com auxílio de imagens BSE e petrografia, foi possível determinar as espécies minerais, suas relações texturais e temporais.

Os anfibólios presentes no diorito (C3P17) são magnesiohornblenda e actinolita. A magnesiohornblenda ocorre em duas gerações, indicando sutil modificação das condições de metamorfismo. A actinolita foi encontrada em apenas um ponto analítico, sendo provavelmente, um mineral de alteração, sem significado metamórfico.

Já na amostra de anfibolito (C3P2), os anfibólios identificados são tschermakita, sendo esta do primeiro evento metamórfico (evidenciado por petrografia) e magnesiohornblenda, do segundo evento metamórfico. Esta mudança de espécie mineral indica, um aumento sutil, mas significativo, das condições de metamorfismo a qual a rocha esteve sujeita.

Rocha metavulcanoclástica (C3P4), é constituída de duas gerações de magnesiohornblenda, com composições ligeiramente diferenciadas, suficientes para determinar o aumento das condições metamórficas pelas quais a rocha foi submetida.

As três litologias possuem minerais indicadores de metamorfismo em fácies anfibolito inferior.

Cromitas de cromita-talco-magnesita granofels (BO13, C3P10 e C4P4) foram analisadas em microsonda eletrônica e mapas composicionais foram elaborados a partir de tal. Os dados químicos obtidos indicam que os espinélios são metamórficos de fácies xisto verde a anfibolito inferior, não havendo preservação de porções ígneas. A zonação presente nos minerais é de reequilíbrio em condições não-metamórficas, e ocorre como bordas de magnetita que preenchem fraturas.

A turmalina não apresenta zonação cristalina, o que indica origem oceânica do mineral (Arena *et al.*, 2018; Hartmann *et al.*, 2019). Contudo, foi possível a identificação de zonas de alteração nos cristais de turmalina. Essas zonas ocorrem devido o equilíbrio químico do mineral com a clorita presente no turmalinito (BO19).

Os dados de geoquímica de rocha total e microsonda eletrônicas obtidos das amostras de cromita-talco-magnesita granofels foram conclusivos para correta classificação da rocha que, até então, era nomeada de listvenito. A ausência de SiO<sub>2</sub> livre e mica flogopita foram os indícios utilizados para reclassificar a rocha. Também não foram encontrando indícios de presença de metais de interesse econômico.

Geoquímica de rocha total realizadas em serpentinitos não apresentaram resultados satisfatórios, indicando intensa depleção a qual a rocha foi submetida.



Contudo, uma amostra (BO5) apresentou resultados suficientes para classificar a origem tectônica do serpentinito: Peridotito mantélico.

Aeromagnetometria e aerogamaespectrometria obtidas do Ofiolito Bossoroça tiveram boas respostas devido a grande discrepância química entre as unidades aflorantes na região. Por meio dos mapas aéreos de maior detalhe, foi possível identificar, aproximadamente, os contatos entre as litologias. As relações de contato não puderam ser identificadas em campo devido a escassez de afloramento, fato este que evidencia a importância da ferramenta geofísica.

## REFERÊNCIAS

ARENA, K.R., HARTMANN, L.A., LANA, C. Evolution of Neoproterozoic ophiolites from the southern Brasiliano Orogen revealed by zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemistry. **Precambrian Research** 285, 299-314, 2016.

ARENA, K.R., HARTMANN, L.A., LANA, C. Tonian emplacement of amphibolites in the southern Brasiliano Orogen delimited by U-Pb-Hf isotopes of zircon from metasomatites. **Gondwana Research** 49, 296-332, 2017.

ARENA, K.R., HARTMANN, L.A., LANA, C. U-Pb-Hf isotopes and trace elements of metasomatic zircon delimit the evolution of the Capané ophiolite in the southern Brasiliano Orogen. *International Geology Review* 60 (7), 911-928, 2018a.

ARENA, K.R., HARTMANN, L.A., LANA, C. QUEIROGA, G.N., CASTRO, M.P. Geochemistry and  $\delta^{11}\text{B}$  Evolution of Massive Tourmaline from the Tonian Ibaré Ophiolite, southern Brasiliano Orogen. **Annals Brazilian Academy of Sciences** 2018b.

BABINSKI, M., CHEMALE JR, F., HARTMANN, L.A., VAN SCHMUS, W.R., SILVA, L.C. Juvenile accretion at 750–700 Ma in Southern Brazil. **Geology** 24, 439–442, 1996.

BARNES, S.J., ROEDER, P.L. The Range of Spinel Composition in Terrestrial Mafic and Ultramafic Rocks. **Journal of Petrology** 42 (12), 2279-2302, 2001.

CHEMALE JR., F., HARTMANN, L.A., DA SILVA, L.C. Stratigraphy and tectonism of the Brasiliano Cycle in southern Brazil. *Communs geol. Surv. Namibia* 10,153–168, 1995.

CHEMALE JR., F. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense, in Holz, M., De Ros, L.F. (Eds.), **Geologia do Rio Grande do Sul: Centro de investigação**

**do Gondwana**- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 13–55, 2000.

DABITZIAS S. G. Petrology and genesis of the Vavods cryptocrystalline magnesite deposits, Chalkidiki Peninsula, Northern Greece. **Econ. Geol.**, 75, 1138–1151, 1980.

GHONEIM, M.F., SALEM, I.A., HAMDY, M.M. Origin of Magnesite veins in Serpentinites from Mount El-Rubshi and Mount El-Maiyit, Eastern Desert, Egypt. **ARCHIWUM MINERALOGICZNE** 41–63, 2003.

GUBERT, M.L., PHILIPP, R.P., BASEI, M.A.S. The Bossoroca Complex, São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil. U-Pb geochronology and tectonic implications for the neoproterozoic São Gabriel Arc. **Journal of South American Earth Sciences** 70, 1–17, 2016.

HALLS, C., ZHAO, R., Listvenite and related rocks: perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland. **Mineralium Deposita** 30, 303–313, 1995.

HAMDY M. M. 1997. Geology, mineralogy and geochemistry of some magnesite occurrences and their enveloping country rocks, Eastern Desert, Egypt. M.Sc. Thesis, Tanta University, 261p.

HARTMANN, L.A., Aspectos geológicos e estratigráficos do Complexo Bossoroca, São Sepé, Rs. In: Simposio Sul-Brasileiro de Geologia, II, Florianópolis, SC. 1985.

HARTMANN, L.A., CHEMALE JR., F., PHILIPP, R.P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Iannuzzi, R., Frantz, J.C. (Eds.), **50 Anos de Geologia**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 97–123, 2007.

HARTMANN L.A., WERLE M., MICHELIN C.R.L., LANA C., QUEIROGA G.N., CASTRO M.P., ARENA K.R. Proto-Adamastor ocean crust (920 Ma) described in Brasiliano Orogen from coetaneous zircon and tourmaline. **Geoscience Frontiers**, 10:1623-1633, 2019.

KOPPE, J.C., HARTMANN, L.A., LISBOA, P.F.C., MONTEIRO, R.N. Aspectos geológicos e estratigráficos do Complexo Bossoroca, São Sepé, Rio Grande do Sul. In: Simp. Sul- Brasil. Geol., vol. 2. **SBG, Anais**, Florianópolis, Brasil, pp. 32-36, 1985.

LEITE, J.A.D., HARTMANN, L.A., MCNAUGHTON, N.J., CHEMALE JR., F. SHRIMP U/Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost **Brazil**. **International Geology Review** 40, 688–705, 1998.

MOLLER, P. Minor and trace elements in magnesite. In: P. Moller (Ed.), *Monograph series on mineral deposits*, 28, 173–195. Gebr. Borntraeger, Berlin–Stuttgart, 1989a.

PHILIPP, R.P., PIMENTEL, M.M., CHEMALE JR., F. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in southern Brazil. Geological relationships and U-Pb geochronology. **Brazilian Journal of Geology** 46, 83–104, 2016.

PHILIPP, R.P., PIMENTEL, M.M, BASEI, M.A.S. The Tectonic Evolution of the São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil: The Closure of Charrua Ocean. **Geology of Southwest Gondwana** 10, 243-265, 2018.

PERTILLE, J., HARTMANN, L.A., SANTOS, J.O.S., MCNAUGHTON, N.J., ARMSTRONG, R. Reconstructing the Cryogenian-Ediacaran evolution of the Porongos fold and thrust belt, Southern Brasiliano orogen, based on zircon U-Pb-Hf-O isotopes. **International Geology Review** 59, 1532–1560, 2017.

RAMOS, R.C., KOESTER, E., VIEIRA, D.T., PORCHER, CC., GEZATT, J.N., SILVEIRA, R.L. Insight on the evolution of the Arroio Grande Ophiolite (Dom Feliciano Belt, Brazil) from Rb-Sr and SHRIMP U-Pb isotopic geochemistry. **Journal of South American Earth Sciences** 86, 38-53, 2018.

REMUS, M.V.D., MCNAUGHTON, N.J., HARTMANN, L.A., KOPPE, J.C., FLETCHER, I.R., GROVES, D.I., PINTO, V.M. Gold in the Neoproterozoic juvenile Bossoroca Volcanic Arc of Southernmost Brazil: isotopic constraints on timing and sources. **Journal of South American Earth Sciences** 12, 349–366, 1999.

SAALMANN, K., HARTMANN, L.A., M.V.D., REMUS, M.V.D., KOESTER, E, CONCEIÇÃO, R.V. Sm–Nd isotope geochemistry of metamorphic volcano-sedimentary successions in the São Gabriel Block, southernmost Brazil: evidence for the existence of juvenile Neoproterozoic oceanic crust to the east of the Rio de la Plata craton. **Precambrian Research** 136, 159–175, 2005<sup>a</sup>.

SAALMANN, K., REMUS, M.V.D., HARTMANN, L.A. Geochemistry and Crustal Evolution of Volcano-sedimentary Successions and Orthogneisses in the São Gabriel Block, Southernmost Brazil - Relics of Neoproterozoic Magmatic Arcs. **Gondwana Research** 8, 143–161, 2005<sup>b</sup>.

SAALMANN, K., GERDES, A., LAHAYE, Y., HARTMANN, L.A., REMUS, M.V.D., LÄUFER, A. Multiple accretion at the eastern margin of the Rio de la Plata craton: The prolonged Brasiliano orogeny in southernmost **Brazil**. **International Journal of Earth Sciences** 100, 355–378, 2011.

SANFORD, R. F. Growth of ultramafic reaction zones in greenschist to amphibolite facies metamorphism. **Amer. J. Sci.**, 282, 543-616, 1982.

WILDNER, W. Caracterização geológica e geoquímica das Sequências, ultramáfica e Vulcano-sedimentares da região da Bossoroca – RS. Dissertação. IGEO/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 169 p, 1990.

WINTER, D.J. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice hall, 2001.

## APÊNDICE A- ARTIGO SUBMETIDO DE ASSUNTO AFIM

11/07/2019

ScholarOne Manuscripts

 Anais da Academia Brasileira de Ciências

 Home

 Author

 Review

### Submission Confirmation

 Print

Thank you for your submission

#### Submitted to

Anais da Academia Brasileira de Ciências

#### Manuscript ID

AABC-2019-0791

#### Title

Aeromagnetometry and aerogammaspectrometry integrated with U-Pb zircon geochronology of northern Bossoroca ophiolite, Brasileiro Orogen

#### Authors

Hartmann, Léo  
 Massuda, Amanda  
 Alves, Tiara  
 Lana, Cristiano  
 Leandro, Carolina  
 Savian, Jairo

#### Date Submitted

11-Jul-2019

Author Dashboard

<b>ANEXO I</b>
Título da Dissertação/Tese:
<b>“EVOLUÇÃO MINERALÓGICA DA PORÇÃO NORTE DO OFIOLITO BOSSOROCA, TERRENO SÃO GABRIEL”</b>
Área de Concentração: Geoquímica
Autora: <b>Amanda Juliano Massuda</b>
Orientador: Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann
Examinadora: Profa. Dra. Juliana Pertille da Silva
Data: 09/03/2020
Conceito: B
<b>PARECER:</b>
<p>A dissertação com o título “EVOLUÇÃO MINERALÓGICA DA PORÇÃO NORTE DO OFIOLITO BOSSOROCA, TERRENO SÃO GABRIEL” representa uma importante contribuição para a geologia do Rio Grande do Sul. O trabalho apresenta dados de geofísica e química mineral para amostras de diorito, metavulcânica, serpentinito, cloritito, turmalinito, anfíbolito e cromita-talco-magnetita granofels do ofiolito Bossoroca e adjacências. Para essas amostras foram analisados em microsonda eletrônica os minerais hornblenda, turmalina, Cr-spinélio, magnetita, clorita, feldspatos, prehnita, entre outros. Com os dados obtidos a autora sugere que Ofiolito Bossoroca registra processos ocorridos no fundo oceânico, através de rochas metassomáticas como turmalinito e cromita talco magnetita granofels. Os dados permitiram ainda identificar dois eventos de metamorfismo regional, particularmente bem representados, na amostra analisada de anfíbolito.</p> <p>Apesar da qualidade e da importância dos dados alguns aspectos da dissertação merecem atenção. O trabalho carece de objetivos mais específicos, que auxiliariam na organização do texto, na apresentação dos resultados e na construção argumentativa do capítulo de discussões. Análises de geoquímica de rocha são mencionadas no texto, mas não são apresentadas no capítulo de resultados. Não fica claro se as análises foram realizadas, pois o trabalho não apresenta uma tabela com os resultados. Ou seria a <i>Supplementary Table 15</i>? Um ponto crítico do trabalho é a ausência da descrição petrográfica detalhada, com as paragêneses metamórficas e as principais relações texturais de cada um dos litotipos estudados. A petrografia é a base dos estudos em petrologia metamórfica e muitas informações sobre os processos metassomáticos e de metamorfismo regional poderiam ser observados através da sua apresentação. Além disso, de forma geral, o capítulo carece de organização. As figuras 18 e 19 não são descritas no capítulo de resultados. As legendas poderiam ser complementadas por informações pertinentes aos resultados.</p> <p>No capítulo de discussões as referências apresentadas nas figuras 12, 13 e 18 não são discutidas no texto. Informações sobre outros ofiolitos do Rio Grande do Sul, suas idades e processos são muito brevemente mencionadas, ou mesmo</p>



ausentes no capítulo. Nesse sentido, não fica claro no texto qual a relevância dos dados para o contexto geológico regional e evolução tectônica do RS. Da mesma forma os resultados de geofísica são pouco explorados. Qual é a relação entre a assinatura geofísica e a composição das rochas do ofiolito e suas adjacências?

Considero que o trabalho apresenta dados importantes e de alta qualidade, mas necessita de maiores revisões. O conceito final é B.


Assinatura:

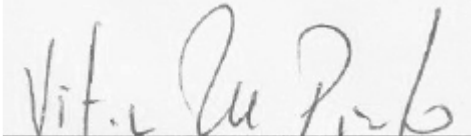
Data: 20/03/2020

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

<b>ANEXO I</b>
Título da Dissertação/Tese:
<b>“EVOLUÇÃO MINERALÓGICA DA PORÇÃO NORTE DO OFIOLITO BOSSOROCA, TERRENO SÃO GABRIEL”</b>
Área de Concentração: Geoquímica
Autora: <b>Amanda Juliano Massuda</b>
Orientador: Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann
Examinador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus
Data: 26 de março de 2020
Conceito: A (Excelente)
<b>PARECER:</b>
<p>O trabalho aborda rochas máfico-ultramáficas, vulcanoclásticas e metassomatitos associados na região da Bossoroça, terreno São Gabriel. A Dissertação apresenta, como parte principal, um artigo submetido ao Brazilian Journal of Geology focalizando a evolução mineralógica de anfibólio, Cr-espinelio, turmalina, plagioclásio, clorita além de outras espécies oriundas de amostras selecionados. Adicionalmente o trabalho apresenta mapas aerogeofísicos utilizados para identificar e separar diferentes tipos litológicos, nomeadamente as rochas ultramáficas. Considero que o texto está bem elaborado com ilustrações adequadas e o assunto é abordado e conduzido de maneira adequada.</p> <p>A composição química das amostras de serpentinito mostram que fazem parte de um sistema químico com alteração e com severa troca de elementos. Mesmo assim a autora classifica uma das amostras, supostamente mais preservada, como relacionada a protólito originado de peridoto mantélico. A autora segue a linha mais recente e interpreta a origem destas associações máfico-ultramáficas como pertencente a um sistema ofiolítico. A composição química dos minerais obtidas por microsonda eletrônica, tanto em análises pontuais como em mapas composicionais permite a autora propor diferentes fases de metamorfismo em condições baricas variadas. Creio que necessitaria adicionar uma discussão sobre as causas destes eventos de metamorfismo. Um exemplo disto consiste em discutir a possibilidade de que a rocha granofels tenha sido derivada de metamorfismo relacionado a relaxamento termal ou mesmo a metamorfismo de contato (metamorfismo orogênico x metamorfismo estático).</p> <p>Alguns pequenos reparos: sugiro colocar o nome dos minerais (abreviação) nas Figs 7 A e B (fotomicrografias).</p> <p>Finalmente, considero que a aluna atingiu os objetivos da Dissertação e está aprovada com Conceito A (Excelente).</p>

Assinatura:  Data: 26/03/2020
Ciente do Orientador:
Ciente do Aluno:

<b>ANEXO I</b>	
Título da Dissertação/Tese:	
<b>“EVOLUÇÃO MINERALÓGICA DA PORÇÃO NORTE DO OFIOLITO BOSSOROCA, TERRENO SÃO GABRIEL”</b>	
Área de Concentração: Geoquímica	
Autora: <b>Amanda Juliano Massuda</b>	
Orientador: Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann	
Examinador: Prof. Dr. Viter Magalhães Pinto	
Data: 27/03/20	
Conceito: A	
<b>PARECER:</b>	
A dissertação da Amanda J. Massuda está bem escrita, com fácil leitura, bem organizada. O tema é atual, apresenta dados de geoquímica de rocha total, química mineral e dados aerogeofísicos de excelente qualidade. O tratamento dos dados é realizado com	
eficácia, especialmente os de química mineral, apesar de falta de	
aprofundamento em algumas discussões. Os objetivos do mestrado foram atingidos.	
Sugestões: o número de figuras para uma submissão de artigo é excessivo.	
Juntar figuras 12 a 17 de química mineral em, no máximo duas.	
Juntar figuras 1, 2 e 3. Excluir figuras.	
Proposta de estratigrafia do Terreno São Gabriel é muito boa, mas não há discussão profunda no artigo para tal.	
Figura 6 a não mostra muita coisa, pode ser qualquer xisto...juntar figs 6 e 7?	
Cromitas são importantes indicadores petrogenéticos e geotectônicos em complexos ofiolíticos, não apenas para auxiliar em grau metamórfico. Sua química deveria ser tratada, discutida e interpretada.	
Secundário: correção de formatação. Ex: segundo parágrafo da discussão (artigo).	
Assinatura: Viter Magalhães Pinto	
Data: 27/03/20	
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	