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

**GEOLOGIA ISOTÓPICA Sr-Nd DO COMPLEXO SANTA
MARIA CHICO, CRÁTON RÍO DE LA PLATA**

WILLIAN PEDROSO MORAES

ORIENTADOR – Prof. Dr. Edinei Koester

Porto Alegre – 2020

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

**GEOLOGIA ISOTÓPICA Sr-Nd DO COMPLEXO SANTA
MARIA CHICO, CRÁTON RÍO DE LA PLATA**

WILLIAN PEDROSO MORAES

ORIENTADOR – Prof. Dr. Edinei Koester

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Everton Marques Bongioiolo
Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Johildo Salomão Figueirêdo Barbosa
Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory
Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Pampa

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

Porto Alegre – 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Moraes, Willian Pedroso
Geologia Isotópica Sr-Nd do Complexo Santa Maria
Chico, Cráton Río de la Plata / Willian Pedroso
Moraes. -- 2020.
66 f.
Orientador: Edinei Koester.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Escudo Sul-rio-grandense. 2. isótopos de Sr-Nd.
3. Cráton Río de la Plata. 4. granulitos. 5.
anfíbolitos. I. Koester, Edinei, orient. II. Título.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo “Isótopos de Sr e Nd na evolução do Complexo Santa Maria Chico, Cráton Río de la Plata, Sul do Brasil.” no qual são apresentados e discutidos dados isotópicos de Sr e Nd para rochas de protólitos ígneos do Complexo Santa Maria Chico (CSMC), no oeste do Escudo Sul-rio-grandense, que corresponde a um fragmento do Cráton Río de la Plata. O CSMC é formado por rochas metamórficas paleoproterozoica de alto grau, que são subdivididas em i) associação máfica-ultramáfica (AMU, que registra metamorfismo de fácies granulito e consiste em metaultramafitos, granulitos, gnaisses gabroicos a anortosíticos; ii) associação tonalítico-trondhjemítica (ATT, metamorfismo de fácies anfibolito, contem ainda gnaisses graníticos subordinados); e iii) associação paraderivada (AP) com gnaisses quartzo-feldspáticos e silimanita gnaisses com mármore, quartzitos e BIFs subordinadas. AMU possui afinidade toleítica, baixos teores de SiO₂ e alto MgO, enriquecimento em LILE e depleção em HFSE quando normalizado ao manto primitivo, com cristalização fracionada e pequenas assimilações crustais como principal processo de evolução magmática. As assinaturas isotópicas sugerem uma associação de origem mantélica com $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ de 0,700924 a 0,704864; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ de 0,509903 a 0,510096; $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ -0,29 a 3,49 e TDM de 2,1 a 2,4 Ga. ATT é de afinidade cálcico-alcalina, mais diferenciada no teor de SiO₂ com relação à AMU, enriquecida em LILE e HFSE normalizada ao manto primitivo, tendo cristalização fracionada e assimilações crustais muito atuantes durante a diferenciação, com fontes diferentes comparada à AMU. As assinaturas isotópicas também denotam origem mantélica, com $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ de 0,701254 a 0,708815, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ de 0,511022 a 0,512171, $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ de -3,71 a 2,17 e TDM de 2,3 a 2,6 Ga. Ambas as associações apontam para o manto primitivo como fonte, com participação de crosta continental, uma vez que as razões se assemelham às da associação paraderivada, ocorrendo em ambientes dos arcos de ilha que evoluíram para arcos continentais no Cráton Río de la Plata, respectivamente, entre 2,4 e 2,1 Ga.

Palavras-chave: Escudo Sul-rio-grandense; isótopos de Sr-Nd, fontes, manto primitivo, granulito, anfibolito.

ABSTRACT

This Master Thesis is intended as a background for the paper “Sr and Nd isotopic constraints in the evolution of the Santa Maria Chico Complex, Río de la Plata Craton, South Brazil.” In which Sr and Nd isotope data for the igneous protoliths of Santa Maria Chico Complex (SMCC) are presented and discussed. Situated in the West of the Sul-rio-grandense Shield, the SMCC corresponds to a fragment of the Río de la Plata Craton. SMCC is composed of Paleoproterozoic high grade metamorphic rocks, and is subdivided in i) Mafic-ultramafic unit (AMU, that records granulite facies metamorphism and comprises metaultramafics, granulites and gneisses of gabbroic to anorthositic composition; ii) Tonalitic-trondhjemitic unit (ATT, that records amphibolite facies metamorphism and comprises, beside tonalitic and trondhjemitic gneisses, subordinated granitic gneisses; and iii) Paraderived unit (AP) with quartzofeldspathic and sillimanite gneisses with minor occurrences of marble, quartzite and BIF. AMU has tholeiitic affinity, low SiO₂ and high MgO, enriched in LILE and depleted in HFSE normalized to primitive mantle, with crystal fractioning and little crustal assimilation as its main magmatic evolution processes; isotope signature suggests mantellic source with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ from 0,700924 to 0,704864; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ from 0,509903 to 0,510096; $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ from -0,29 to 3,49 and TDM of 2,1 to 2,4 Ga. ATT has calc-alkaline affinity, more differentiate in the SiO₂ amount compared to AMU, enriched in both LILE and HFSE normalized to primitive mantle, having important influence of crustal assimilation and crystal fractioning throughout magma evolution when compared to AMU; isotope signatures also denote mantellic source, with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ from 0,701254 to 0,708815, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ from 0,511022 to 0,512171, $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ from -3,71 to 2,17 and TDM of 2,3 to 2,6 Ga. Both units have primitive mantle source, with participation of continental crust, since their isotope ratios are similar to those of the paraderived unit, occurring in an island arc environment that evolved to continental arc, in the Río de la Plata Craton, at 2.4 and 2.1 Ga, respectively.

Keywords: Sul-rio-grandense Shield; Sr-Nd isotopes, sources, primitive mantle, granulites, amphibolites.

LISTA DE FIGURAS DO TEXTO INTEGRADOR

Figura 1	Mapa simplificado das divisões tectônicas do Escudo Sul-rio-grandense	Pág. 14
Figura 2	Configuração do Gondwana com as principais áreas cratônicas e cinturões relacionados ao Cinturão Dom Feliciano	Pág. 15
Figura 3	Mapa geológico esquemático da área de ocorrência do Complexo Granulítico Santa Maria Chico na porção este do Escudo Sul-rio-grandense	Pág. 17

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO

Figura 1	Mapa do Escudo Sul-rio-grandense com as principais divisões tectônicas.	Pág. 36
Figura 2	Mapa da área de ocorrência do Complexo Granulítico Santa Maria Chico no Escudo Sul-rio-grandense.	Pág. 39
Figura 3	Mapa com a indicação dos locais de amostragem.	Pág. 40
Figura 4	Fotografias de afloramentos do Complexo Santa Maria Chico.	Pág. 43
Figura 5	Fotomicrografias de amostras da Associação Máfica-ultramáfica.	Pág. 44
Figura 6	Fotomicrografias de amostras da Associação Tonalítica-Trondhjemítica.	Pág.46
Figura 7	Diagrama TAS para a classificação das rochas do Complexo Santa Maria Chico	Pág.48
Figura 8	Diagrama SiO ₂ x FeO ^t /MgO para as rochas do Complexo Santa Maria Chico	Pág.49
Figura 9	Diagrama A/CNK vs. A/NK para as rochas do Complexo Santa Maria Chico	Pág.49
Figura 10	Diagramas Harker, elementos maiores e traço, para as rochas do Complexo Santa Maria Chico	Pág.51
Figura 11	Diagramas multielementares normalizados para o manto primitivo para as rochas do Complexo Santa Maria Chico	Pág.52
Figura 12	Diagrama de razão isotópica vs. elementar ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2,1\text{Ga}) \times \text{SiO}_2$) para as rochas do Complexo Santa Maria Chico	Pág.55
Figura 13	Diagrama de $\epsilon\text{Nd}(2,1\text{Ga})$ vs. idade (age) para as rochas do Complexo Santa Maria Chico	Pág.56
Figura 14	Diagrama $\epsilon\text{Nd}(2,1\text{Ga})$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2,1\text{Ga})$ para as rochas do Complexo Santa Maria Chico	Pág.57

LISTA DE TABELAS DO ARTIGO

Tabela 1	Análise de elementos maiores (%), traços (ppm) e razões isotópicas Sr-Nd das rochas do Complexo Santa Maria Chico.	Pág. 47
----------	--	---------

SUMÁRIO

PARTE I

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.2 Localização e geologia regional	12
1.3 Geologia local	14
1.4 Materiais e métodos.....	24
REFERÊNCIAS	26

PARTE II

Artigo: “Isótopos de Sr e Nd na evolução do Complexo Santa Maria Chico, Cráton Río de la lata”.....	32
--	----

PARTE III

Anexos	65
---------------------	----

Estrutura da dissertação:

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo “**Isótopos de Sr e Nd na evolução do Complexo Santa Maria Chico, Cráton Río de la Plata, Sul do Brasil**”, submetido ao periódico *Geologia USP. Série Científica*. Sua organização compreende as seguintes partes principais:

Parte I: Introdução sobre o tema e descrição do objeto de pesquisa de mestrado, onde estão sumarizados os objetivos e a filosofia de pesquisa desenvolvida, bem como o estado da arte sobre o tema da pesquisa;

Parte II: Artigo submetido a periódico com corpo editorial permanente e revisores independentes, escritos pelo autor durante o desenvolvimento do mestrado;

Parte III: Anexos.

PARTE I

1 INTRODUÇÃO

A determinação de razões isotópicas pode fornecer informações importantes sobre a origem dos protólitos, bem como permite inferir processos evolutivos durante a cristalização dos magmas, mesmo em rochas que posteriormente sofreram metamorfismo de alto grau (Rass *et al.*, 2014). As rochas granulíticas tem sido alvo desses estudos isotópicos com intuito de entender, por exemplo, em seus termos ortoderivados, a evolução de protólitos ígneos, os processos magmáticos e as fontes envolvidas na sua gênese.

McCulloch *et al.* (1987) realizaram estudos isotópicos com os sistemas Rb-Sr e Sm-Nd na região de *Fiordland*, Nova Zelândia, onde valores de ϵNd foram utilizados para refutar a hipótese de que leucogabros não-metamorfizados que ocorrem adjacentes a rochas de fácies granulito seriam os protólitos destas, mesmo que ambas apresentem afinidade química cálcico-alcálica. No mesmo estudo, as assinaturas ϵNd demonstraram que várias intrusões de idade semelhante ocorrentes na área não derivaram de um mesmo magma parental.

Tomson *et al.* (2013), em estudos realizados em um terreno granulítico no sul da Índia, onde ocorrem ortognaisses charnoquíticos, identificaram características geoquímicas e isotópicas nessas rochas que indicam a existência de diferentes protólitos gerados em ambientes tectônicos distintos, um ambiente de arco de ilha com razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ menos radiogênicas e um outro grupo de rochas com assinatura de um arco continental maduro, onde os valores são mais radiogênicos.

No Brasil, no Cráton São Francisco, as rochas granitoides granulíticas do Complexo Santa Isabel, Bloco Guanambi-Currentina, foram interpretadas como derivadas de uma mistura de fontes crustais e mantélicas em função de valores de ϵNd levemente negativos a positivos, razões isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,7000 e 0,706 (Barbosa *et al.*, 2019) e que, associadas as outras subunidades, sugerem que o Bloco Guanambi-Currentina é uma unidade independente formada no Norte do cráton.

No Escudo Sul-rio-grandense, sul do Brasil, o Complexo Granulítico Santa Maria Chico é uma unidade paleoproterozoica em que informações sobre sua evolução petrológica a partir de sistemas isotópicos podem ser aplicadas para que o cenário de evolução magmática e metamórfica sejam aprimoradas. Nesse complexo,

trabalhos de mapeamento, petrografia, geoquímica e tectônica têm sido desenvolvidos nas últimas décadas (Nardi e Hartmann, 1979, 1980; Hartmann e Nardi 1980, 1983; Formoso *et al.*, 1980; Fragoso Cesar e Soliani Jr., 1984; Soliani Jr. *et al.*, 1984; Soliani Jr., 1986; Hartmann, 1987, 1988, 1991, 1998; Hartmann *et al.*, 1999, 2000a, 2008; Tickyj *et al.*, 2004; Laux *et al.*, 2010; Laux e Bongioiolo, 2011; UFRGS, 2015, 2016, 2017, 2018; Girelli *et al.*, 2016, 2018, CPRM, 2017). No entanto, estudos de geologia isotópica focados no uso dos sistemas isotópicos como traçadores (*tracers*) petrogenéticos para essa unidade ainda são escassos e podem ser úteis como uma nova ferramenta para auxiliar na compreensão da sua evolução geológica, especialmente frente às discussões recentes quanto a potenciais individualizações de subunidades, bem como fontes e processos magmáticos (UFRGS, 2015; Philipp *et al.*, 2015, CPRM, 2017) e a correlação com outras unidades da porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense.

Dessa forma, será apresentada uma breve descrição do Complexo Granulítico Santa Maria Chico e seu contexto geológico, além de considerações sobre sua importância do ponto de vista da evolução da porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense. Após, é apresentado o artigo denominado “*Isótopos de Sr e Nd na evolução do Complexo Santa Maria Chico, Cráton Río de la Plata*”, submetido para publicação no periódico *Geologia USP. Série Científica*, onde são caracterizadas as rochas do complexo através de estudos de campo, petrografia, geoquímica de rocha total e razões isotópicas de Sr e Nd, que são integradas e interpretadas com os dados disponíveis na literatura.

1.1 Objetivos

O objetivo desta dissertação é compreender a evolução petrológica das rochas ortoderivadas do Complexo Santa Maria Chico, oeste do Escudo Sul-rio-grandense.

Como objetivos específicos:

- Descrever e analisar as texturas e estruturas em micro, macro e meso-escala das rochas do complexo;
- Identificar a presença de rochas com grau metamórficos distintos (granulito ou anfibolito) das rochas ortoderivadas no complexo;
- Analisar, sob ponto de vista de geoquímica de elementos maiores e

traços, as rochas do complexo;

- Analisar, sob ponto de vista de geoquímica isotópica do Sr e do Nd, as rochas do complexo;
- Integrar e interpretar os dados obtidos com os disponíveis na literatura;
- Propor um modelo de evolução petrológica para as rochas do Complexo Santa Maria Chico, Cráton Rio de la Plata, RS.

1.2 Localização e geologia regional

A área de estudo localiza-se na região oeste do estado do Rio Grande do Sul, aproximadamente 400 km da capital Porto Alegre, próxima aos municípios de Bagé e Dom Pedrito. O principal acesso à região se dá através da rodovia BR 290, sentido oeste. Os afloramentos investigados encontram-se em estradas, drenagens e encostas de morros, com acesso a partir de estradas vicinais que cruzam os municípios.

A região de estudo está situada no extremo sul da porção brasileira do Escudo Sul-rio-grandense. Esse escudo é separado em duas grandes unidades, o Cráton Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano. Esse último configura quase a totalidade do Escudo Sul-rio-grandense (porções oriental, central e ocidental), excluindo-se o extremo oeste, onde afloram as rochas do Cráton Rio de la Plata (Fig. 1).

O Cráton Río de La Plata ocorre em uma área no oeste no escudo onde predominam rochas granulíticas paleoproterozoicas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico interpretado como o registro de um arco magmático de 2,4 a 2,1 Ga (Nardi e Hartman, 1979, Girelli *et al.*, 2018).

O Cinturão Dom Feliciano é um cinturão orogênico neoproterozoico desenvolvido durante o ciclo orogênico Brasileiro, que resultou na amalgamação do paleocontinente Gondwana Ocidental (Heilbron *et al.*, 2004). O Cinturão Dom Feliciano se estende por aproximadamente 1200 km desde Punta del Este, no Uruguai, até o nordeste do estado de Santa Catarina no Brasil.

As porções do Cinturão Dom Feliciano foram delimitadas a partir de discontinuidades geofísicas de escala continental (Fernandes *et al.*, 1995; Costa, 1997). Sob ponto de vista geológico-geológico, esses domínios no Cinturão Dom Feliciano podem ser simplificados como:

a) Domínio Ocidental, em limite a oeste com o cráton, cujo predomínio é de rochas ígneas e metamórficas relacionadas a arcos magmáticos e fragmentos de rochas de assoalho oceânico e bacias associadas (Silva Filho e Soliani Jr., 1989; Kraemer, 1995; Leite *et al.*, 1998);

b) Domínio Central, em limite com o Domínio Ocidental dado pela Sutura de Caçapava, onde dominam rochas metasedimentares vinculadas a bacias de *back-arc* e/ou *forearc*, bem como fragmentos de rochas paleoproterozoicas ortoderivadas (Porcher *et al.*, 1999, Remus *et al.*, 2002; Philipp *et al.*, 2004, Gregory *et al.*, 2015);

c) Domínio Oriental, em limite com o Domínio Central, dado pela Sutura de Porto Alegre (e/ou Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu), formado predominantemente por rochas granitoides criogenianas (Complexo Pinheiro Machado) relacionadas a um arco magmático e/ou pós-colisionais e intenso magmatismo vinculado a zonas de cisalhamento (Philipp, 1998; Koester *et al.*, 2002; Bitencourt e Nardi, 2000). A porção sudeste do Domínio Oriental do Cinturão Dom Feliciano foi subdividida no denominado Terreno Punta Del Este, em limite dado pela Sutura Arroio Grande (ou Zona de Cisalhamento Arroio Grande), e formado por rochas metasedimentares vinculadas a bacias de *back-arc* e/ou *forearc*, bem como fragmentos de rochas de assoalho oceânico e rochas neoproterozoicas tonianas orto e paraderivadas vinculadas a um arco magmático (Lenz *et al.*, 2012; Peel *et al.*, 2018; Ramos *et al.*, 2018, Cruz, 2019).

No final do neoproterozoico (< 600 - 550 Ma), diversos corpos plutônicos intrudem de forma sistemática todo o Escudo Sul-rio-grandense (e.g. Granito Santo Afonso – Cráton Rio de La Plata (Camozzato *et al.*, 2013); Granito Caçapava do Sul – Domínio Ocidental (Bitencourt e Nardi, 1989); Sienito Piquiri – Domínio Central (Nardi *et al.*, 2008); Granito Capão do Leão – Domínio Oriental (Silva, 2015); Granito Bretanha, Terreno Punta Del Este (CPRM, 2019). Ainda no final do neoproterozoico e início do Cambriano, ocorre, acima das rochas do escudo, a deposição de Bacia do Camaquã, representada por expressiva sedimentação e vulcanismo na porção centro-oeste do escudo (Paim *et al.*, 2000).

A porção onde se desenvolveu a presente pesquisa também é denominada de Domínio La Plata (Costa, 1997), de Complexo Granulítico Santa Maria Chico de Nardi e Hartmann (1979), ao Terreno Taquarembó de Wildner (2006) ou de Cráton Rio de La Plata de Fernandes *et al.* (1995) Nesse trabalho, a denominação adotada será a mais clássica da literatura, o Cráton Rio de la Plata.

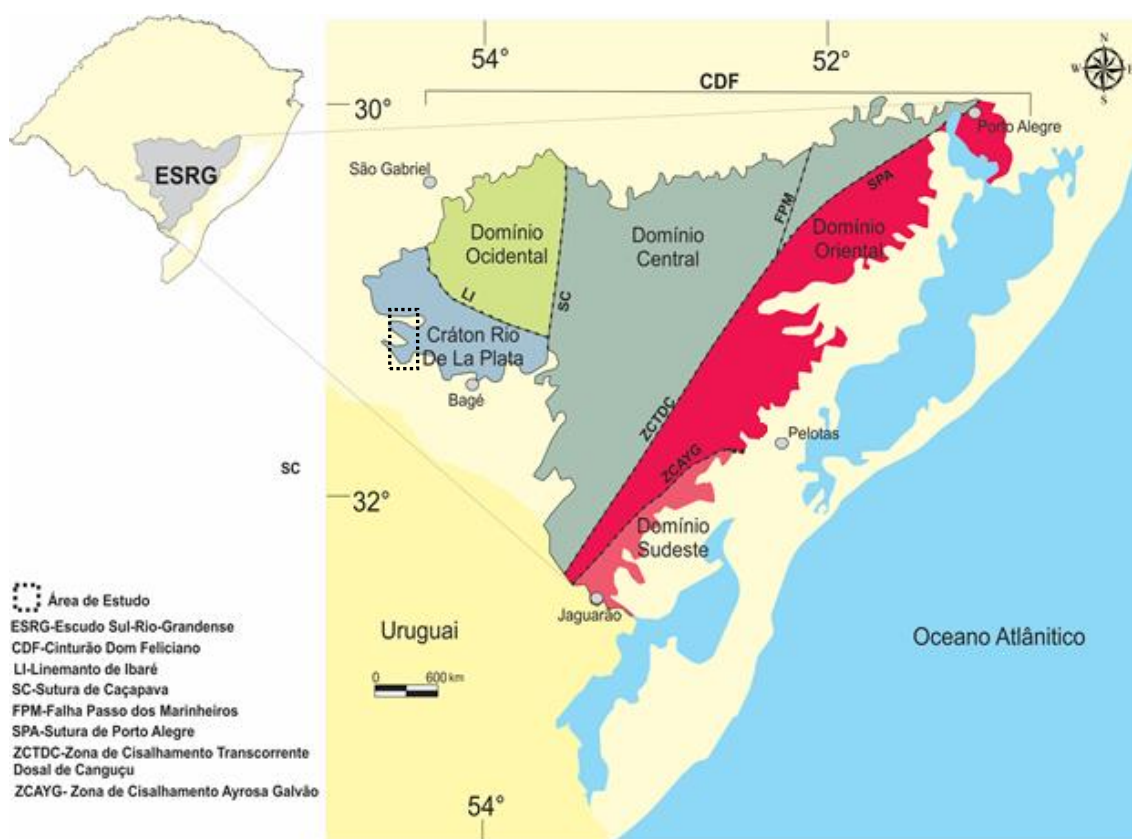


Figura 1. Mapa geológico simplificado das divisões tectônicas do Escudo Sul-rio-grandense, seus limites e a localização da área de estudo, na região oeste (modificado de Bastos *et al.*, 2020).

1.3 Geologia local

O Complexo Granulítico Santa Maria Chico foi definido e formalmente proposto por Nardi e Hartmann (1979), após ser descrito por trabalho de mapeamento da UNISINOS, coordenado pelos autores.

“Os autores propõem formalmente a designação de COMPLEXO GRANULÍTICO SANTA MARIA CHICO para os terrenos granulíticos do Escudo Sul-rio-grandense (Fig. 2, Embasamento Arqueano e Paleoproterozoico), com seção-tipo ao longo das cabeceiras do Arroio Santa Maria Chico, situado próximo a Dom Pedrito, RS”.

(Nardi e Hartmann, 1979, p. 68)

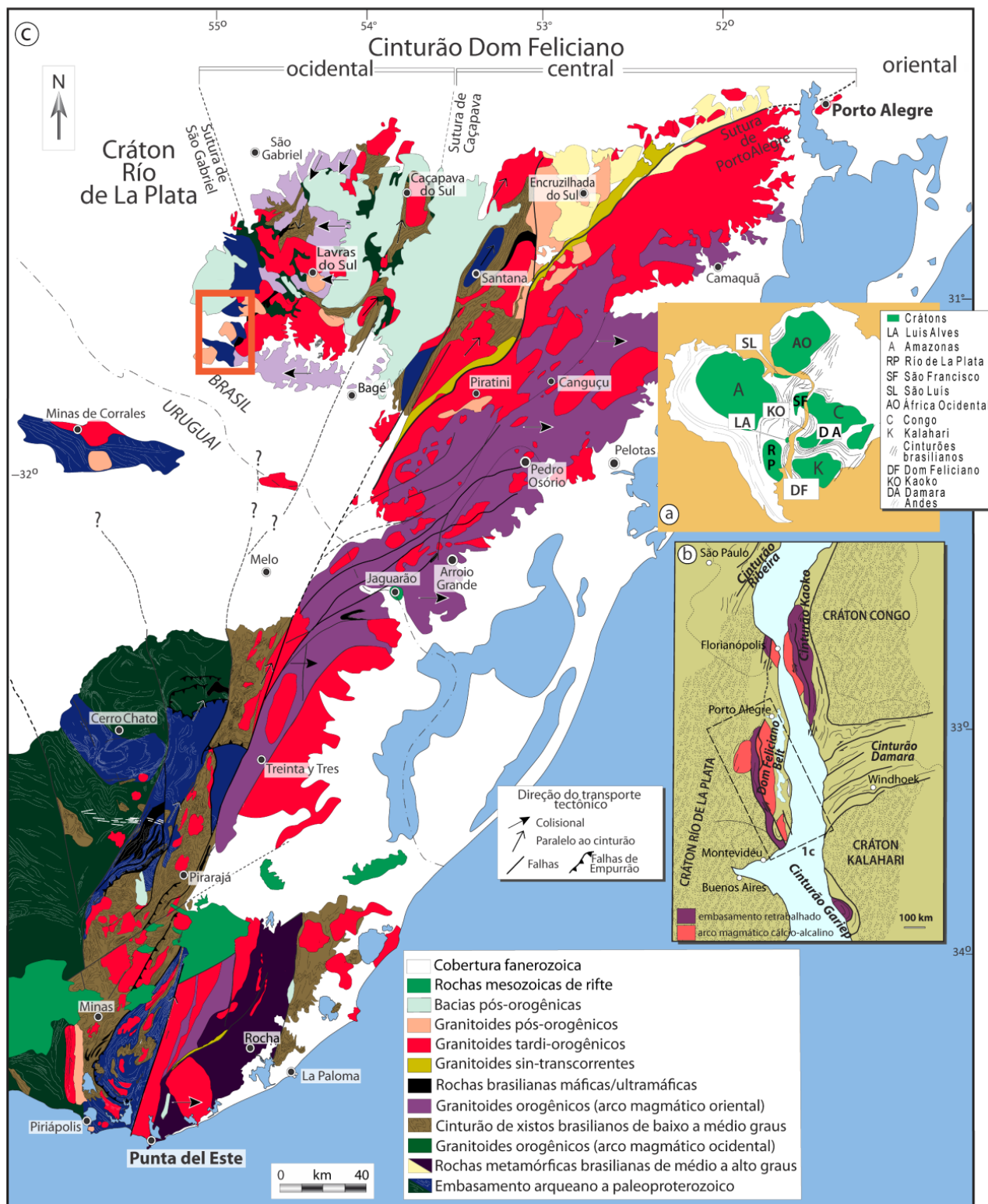


Figura 2. A) Configuração do Gondwana com as principais áreas cratônicas e cinturões relacionados ao Cinturão Dom Feliciano; B) Localização do Cinturão Dom Feliciano e cinturões africanos adjacentes na configuração do Gondwana; C) Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano e Cráton Rio de La Plata no sul do Brasil e Uruguai e a localização da área de estudo, marcada pelo retângulo laranja (Modificado de Masquelin *et al.*, 2012).

O Complexo Granulítico Santa Maria Chico (Fig. 3) ocorre na porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense e é composto por um conjunto de rochas metamórficas de alto grau (Hartmann *et al.*, 2008) que compreende gnaisses quartzo-feldspáticos, granulitos, gnaisses básicos, anortositos, ultramafitos, silimanita gnaisses e mármores. Os dois últimos podem conter quartzitos, formações ferríferas bandadas (BIFs), e gnaisses calcissilicáticos (Nardi e Hartmann, 1979). Para Nardi e Hartmann (1979), os gnaisses quartzo-feldspáticos têm textura granoblástica e são formados por plagioclásio, quartzo, pouco ou nenhum K-feldspato, hiperstênio, diopsídio e hornblenda; como acessórios ocorrem opacos, apatita, zircão e esfero, e como minerais indicadores de retrometamorfismo ocorrem actinolita, clorita e epidoto. Os gnaisses básicos diferem dos quartzofeldspáticos somente na proporção dos minerais, apresentando pouco ou nenhum quartzo com maior concentração de máficos e plagioclásio, chegando a ser localmente anortosíticos. Os ultramafitos são granoblásticos, contendo hiperstênio, diopsídio, hornblenda, espinélio verde (picotita) e plagioclásio (andesina). Os anortositos também são granoblásticos com plagioclásio cálcico e ocorrem ainda diopsídio, hornblenda, apatita e opacos como acessórios. Actinolita ocorre como mineral retrometamórfico nos ultramafitos e anortositos. Em todas as litologias descritas observa-se que o plagioclásio ocorre sericitizado e o hiperstênio apresenta coroas de reação para diopsídio, hornblenda, talco e actinolita – sendo as duas primeiras texturas apontadas como reações de alta temperatura e as duas últimas de mais baixa temperatura.

Philipp *et al.* (2015) subdividem o CGSMC em ortognaisses e rochas metamáficas-ultramáficas estratiformes, baseados em mapeamento em escala 1:100.000 da Folha Igreja, e definem a primeira subunidade como gnaisses tonalíticos e granodioríticos, com metadioritos e metahornblenditos associados e a segunda subunidade como gnaisses máficos, compreendendo metagabros, metapiroxenitos, metanoritos e metanortositos, estes dois últimos de rara ocorrência, e metaultramafitos, compreendendo metadunitos, metaperidotitos, serpentinitos e xistos magnesianos.

CPRM (2017) propõe que o complexo tenha seja dividido em i) unidade ortoderivada máfica com rochas que apresentam estrutura maciça e/ou gnáissica, com intrusões graníticas comuns. Rochas plutônicas são as mais preservadas e a textura granulítica é comum; ii) unidade ortoderivada granítica com rochas que apresentam estrutura gnáissica ou milonítica, podendo ocorrer nas outras unidades

na forma de intrusões, que podem ou não estar metamorizadas na fácies granulito; iii) unidade paraderivada com rochas com estruturas gnáissicas, bandas ricas em plagioclásio, além da presença de pórfiros de granada e comuns injeções de granitos, ou estruturas miloníticas. Localmente ocorrem lentes de mármore. Essa divisão do complexo é similar à proposta por Girelli *et al.* (2018) com a seguinte denominação: i) unidade básica-ultrabásica, ii) unidade ácida-intermediária e iii) unidade paraderivada.

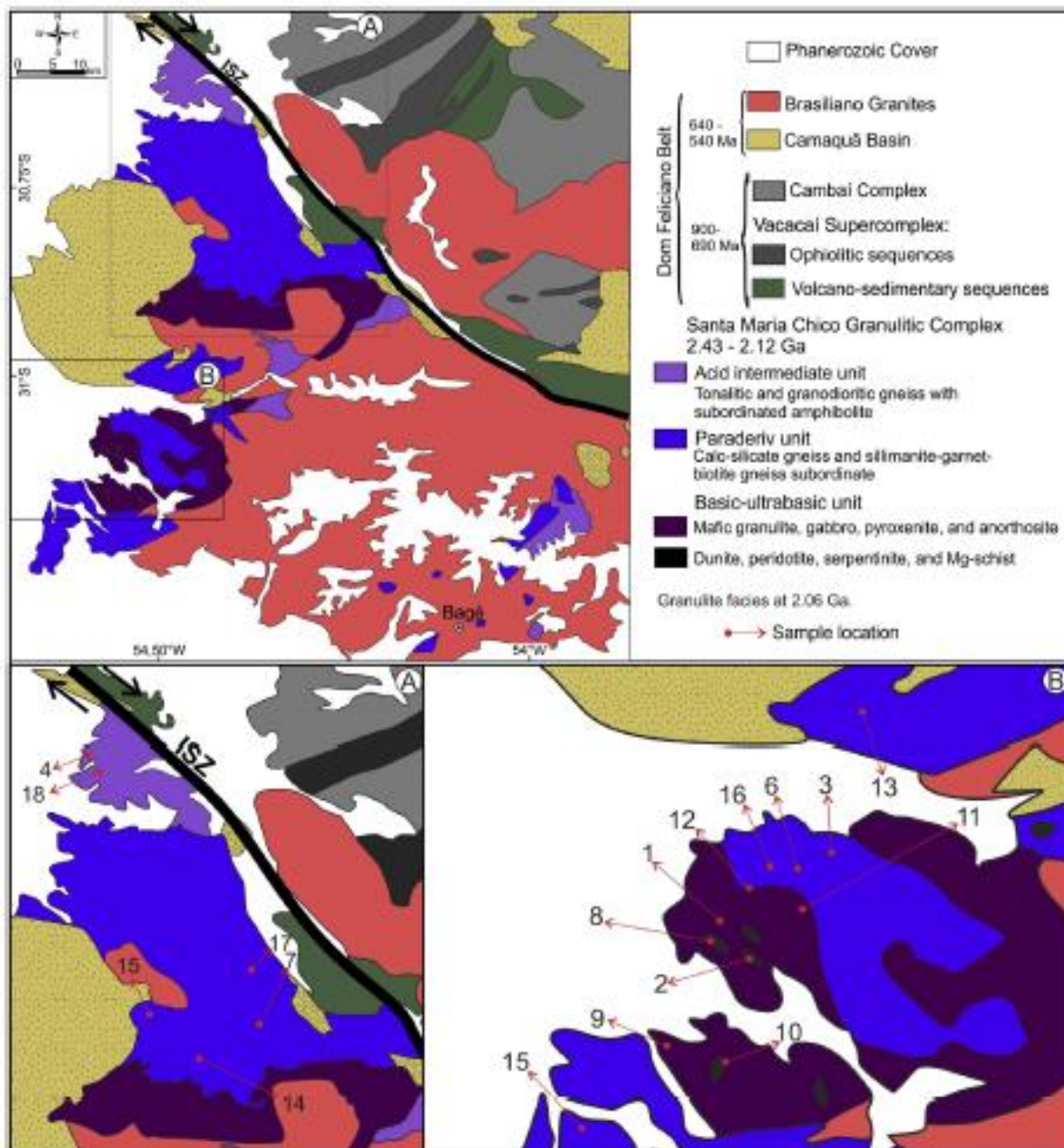


Figura 3. Mapa geológico esquemático da área de ocorrência do Complexo Granulítico Santa Maria Chico na porção este do Escudo Sul-rio-grandense. A e B) Detalhes das áreas de ocorrência das rochas do complexo. Extraído de Girelli *et al.* (2018).

Três diferentes eventos metamórficos foram postulados para as rochas do complexo por Nardi e Hartmann (1979), sendo o primeiro deles de fácies granulito, tendo gerado a paragênese hiperstênio + diopsídio + andesina + granada, situando as condições de pressão acima dos 5-6 kbar. Um evento regional de retrometamorfismo na fácies anfíbolito é indicado por coroas de reação de hornblenda em piroxênios, mas os autores não descartam que a hornblenda poderia ter cristalizado em equilíbrio com a mineralogia de fácies granulito, caracterizando então a zona hornblenda + ortopiroxênio da fácies granulito, pois as evidências petrográficas são ambíguas. Por fim, um retrometamorfismo generalizado na fácies xistos verdes é atestado pela ocorrência ampla de actinolita (+ clorita e epidoto) e talco, que ocorrem substituindo total ou parcialmente os minerais máficos dos gnaisses. Este retrometamorfismo seria causado pelas intrusões graníticas brasileiras, sendo que os minerais desta paragênese ocorrem de maneira irregular ao longo de fraturas, que possibilitariam o acesso de água, uma vez que granulitos são rochas refratárias e rígidas.

Hartmann (1988) determinou dados de geotermobarometria referentes ao segundo evento metamórfico do complexo, através de uma amostra de granulito máfico e uma de metapiroxenito. Para a primeira amostra, os valores estimados de temperatura foram de 810°C utilizando clinopiroxênio e ortopiroxênio. Estimativas de pressão foram obtidas empregando-se granada + ortopiroxênio + plagioclásio e granada + clinopiroxênio + plagioclásio; em ambos os métodos o autor obteve valores de 9,4 kbar. No mesmo trabalho, análises de elementos maiores, traço e terras raras foram apresentadas, revelando que as rochas máficas do CGSMC mostram afinidade toleítica de acordo com o diagrama AFM e que todas as litologias são empobrecidas tanto em elementos incompatíveis quanto em ETR, o que o autor atribui a condições de pressão em torno de 10 kbar e uma elevada razão PCO_2/PH_2O .

Hartmann *et al.* (2000b) revisa e sumariza diversos trabalhos sobre a P e T do complexo propondo quatro eventos metamórficos: M1, M2, M3 e M4, que são descritos como abaixo:

M1, como um evento pré-tectônico com assembleia resultante sendo ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio + ilmenita/magnetita. O autor, entretanto, não descarta a possibilidade de que os porfiroblastos de plagioclásio e piroxênios com

exsoluções, atribuídos ao evento metamórfico M1, sejam na realidade minerais de origem ígnea preservados.

M2, o responsável pela geração da mineralogia e texturas preservadas na rocha e para o qual são apresentadas informações geocronológicas e termobarométricas, sin a pós-tectônico com assembleia resultante ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio + granada + hornblenda + biotita + ilmenita/magnetita + quartzo, grau alto e fácies granulito.

M3, sendo um evento de retrometamorfismo causado pelo contato relacionado à intrusão de corpos graníticos do Ciclo Brasileiro, como o Granito Santo Afonso, cuja assembleia é composta de anfibólios + clorita + talco + epidoto. O plagioclásio não teria sofrido alterações composicionais em M3 e este evento não teria gerado estruturas penetrativas. O autor observa a alteração de minerais máficos para pequenos cristais de temperatura mais baixa, enquanto minerais anidros permanecem com a mesma textura de M2, inalterados, e considera estes fatores indicativos de que M3 é um evento do tipo termal de contato.

M4, ocorrendo por transformação das assembleias anteriores ao longo de zonas de cisalhamento e fraturas, de assembleia epidoto + clorita + microclínio.

Girelli *et al.* (2018) estudam as rochas do complexo a partir de pseudosseções e propõem temperaturas da ordem de 830–870 °C e pressões de 6.7–7.2 kbar a 2,3 Ga relacionadas ao metamorfismo relacionado a um arco e um segundo evento interpretado pelos autores como vinculado à colisão continental ocorrida em torno de 2,1 Ga com temperatura de 770–790 °C e pressão de 8,7–9,1 kbar.

Philipp *et al.* (2015) constata que o metamorfismo é progressivo da fácies anfibolito (paragênese plagioclásio + hornblenda + epidoto) até a fácies granulito (paragênese hiperstênio + diopsídio + plagioclásio e diopsídio + hiperstênio + espinélio) em condições de temperatura de 800 a 900°C e pressão entre 5 e 6 kbar. Os autores ainda observam o retrometamorfismo em fácies albíta-epidoto *hornfells* a hornblenda *hornfells*, cuja causa seria as intrusões graníticas.

Nardi e Hartmann (1979, 1980) estudaram sob ponto de vista geoquímica as rochas do complexo e propõem que os granulitos são empobrecidos em K₂O quando comparados a outros terrenos granulíticos do mundo. Os autores sugerem que baixos valores de K podem ser consequência da alta pressão durante o metamorfismo, que também pode ter afetado o teor de Rb, similar ao enriquecimento em Ga observado e atribuído ao enriquecimento em Al. Os autores sugerem que o Ti, Ga e Zr são bons

elementos para os estudos petrológicos, devido à sua imobilidade. O Ti apresenta enriquecimento muito leve nos gnaisses intermediários, comportamento oposto às sequências magmáticas. O Zr se comporta como nas séries magmáticas, enquanto o Ga somente reflete o comportamento do Al, o mesmo acontecendo com Sr em função do Ca. Segundo os autores, o decréscimo observado na razão Ca/Sr nos gnaisses mais silicosos pode indicar remoção parcial de Sr nos gnaisses básicos. Outra razão apontada para o empobrecimento em K e Rb seria que os granulitos são resíduos de rochas que sofreram fusão parcial. O Ba, no caso, enriqueceu por ter carga mais elevada e o raio iônico maior. O baixo conteúdo de Rb e K, a razão Rb/K, faz os autores cogitarem a atuação dos granitoides intrusivos como agentes de um metassomatismo alcalino.

Formoso *et al.* (1980) discute a razão K/Rb nos granulitos. Segundo os autores, duas populações de granulitos podem ser estabelecidas baseadas na razão K/Rb: material continental crustal (~ 250) e crosta inferior/manto (> 500). Ainda segundo Formoso *et al.* (1980), no CGSMC, a razão Rb/Sr não evidencia o metassomatismo, devido aos altos teores de Sr – que estão associados à alta concentração de Ca – enquanto a razão Ba/Rb mostra valores baixos, refletindo, esta sim, os efeitos do metassomatismo; a baixa razão K/Ba, segundo os autores, indica apenas empobrecimento em K durante o metamorfismo.

Laux e Bongioiolo (2011) mostram que as rochas máficas do CGSCM apresentam boa correlação em diagramas de *Harker* utilizando-se SiO₂ como elemento de diferenciação. Através de diagramas multielementares normalizados, os autores mostram que as rochas da unidade máfica apresentam padrão de elementos traço de arcos de ilhas oceânicas. O diagrama AFM mostra afinidade toleítica à cálcico-alcalina, e o diagrama Zr *versus* Ti mostra que as amostras plotam majoritariamente no campo dos basaltos de arco de ilhas.

CPRM (2017) realiza o primeiro estudo geoquímico detalhado do complexo e propõe que a Unidade Ortoderivada Máfica tem dois grupos de afinidades, uma cálcico-alcalina e outro toleítico, sugerindo que essa unidade represente basaltos do tipo MORB formados em ambientes de arcos de ilha e intraplacas. Por sua vez, a unidade ortoderivada granítica tem afinidade cálcico-alcalina a toleítica com rochas formadas em ambientes de arco de ilhas. Nesse mesmo enfoque, Girelli *et al.* (2018) propõem que as rochas ortoderivadas do complexo foram geradas em um ambiente de arco de ilhas.

Quanto à geologia estrutural, Nardi e Hartmann (1979) descreveram as rochas do complexo como isótropas a bandadas com predomínio da direção NW-SE e altos valores de mergulho. Philipp *et al.* (2015) observa que os corpos lenticulares estão colocados conforme a foliação NW-SE e ressalta a concordância estrutural entre as unidades, com a ressalva de uma área na parte sul do complexo onde falhas normais a transcorrentes de direção N60-70°E rotacionam os ortognaisses. Estas falhas, segundo os autores, estão relacionadas à colocação dos granitos da Suíte Santo Afonso.

UFRGS (2015) apresentou dados estruturais em maior detalhe e constatou que a direção predominante do bandamento é NW-SE, e na área em estudo ocorre uma zona de cisalhamento N-S que trunca o complexo na porção central da área mapeada.

Nardi e Hartmann (1979) estimaram uma idade de cristalização de 2700 Ma para o CGSMS, com base na idade dos Granulitos de Santa Catarina, que seria correspondente ao Ciclo Jequié, e uma idade de 600 Ma, correspondente ao Ciclo Brasileiro, para a idade do retrometamorfismo.

Os estudos geocronológicos no complexo foram iniciados com os diagramas isocrônicos Rb-Sr obtidos por Soliani Jr. (1986) que propõem duas idades Paleoproterozoicas para o magmatismo $2,03 \pm 73$ Ma e $1,98 \pm 266$ Ma Ga.

Hartmann (1987) apresentou uma isócrona Sm-Nd baseada em granada + plagioclásio de um metapelito e granada + clinopiroxênio de um gnaiss máfico, que resultou em idade metamórfica de 2,1 Ga. O mesmo trabalho apresenta uma idade de 2,6 Ga para o protólito ígneo, obtida por Sm-Nd em rocha total.

Hartmann *et al.* (1999) apresenta idades SHRIMP (*Sensitive high resolution ion microprobe*) por U-Pb em zircões de duas amostras, um metabasalto e um metatrondhjemitó. Os autores descrevem nos zircões bordas metamórficas e núcleos ígneos com zonação, com idades obtidas de cerca de 2,5 Ga para os protólitos e 2,1-2,0 Ga para o metamorfismo de fácies granulito.

Hartmann *et al.* (2000a) encontraram idades U-Pb por SHRIMP em zircões de 2510 Ma para um granulito máfico e 2550 Ma para um metatrondhjemitó e de cerca de 2,02 Ga para o metamorfismo. Hartmann *et al.* (2008) também apresentaram dados geocronológicos para rochas do CGSMC, determinadas por U-Pb em zircões analisados por SHRIMP, cujas idades variam entre 2.035 ± 9 Ma e 2.006 ± 3 Ma para o metamorfismo, 2.489 ± 6 Ma para a cristalização dos protólitos máficos, referidos

pelo autor como metabasaltos, e 2.366 ± 8 Ma para os félsicos, referidos pelo autor como suíte Tonalítica-Trondhjemítica.

Tickyj *et al.* (2004) realizaram datações por microsonda eletrônica em monazitas do complexo e encontraram idade de 1.899 ± 43 Ma, possivelmente uma idade metamórfica.

Laux *et al.* (2010) obtiveram idades U-Pb em zircões (LA-ICP-MS) de duas amostras do complexo, sendo um granulito máfico com idade de cristalização de 2,4 Ga e um gnaiss calcissilicático cuja idade mais jovem encontrada foi de 2,0 Ga. CPRM (2017) analisou uma amostra de origem sedimentar do complexo, a partir do sistema U-Pb LA-ICP-MS em zircão, e obteve uma idade $2.331 + 31$ Ma como idade máxima da sedimentação, e uma idade de $2.072 + 44$ Ma interpretada como de metamorfismo.

Girelli *et al.* (2016) apresentam dados de Lu-Hf em zircão para cinco amostras da unidade máfica-ultramáfica, encontrando idades de cristalização entre 2.173 ± 20 e 2.413 ± 13 Ma, no que os autores ressaltam uma diferença de 250-200 Ma na idade de cristalização dos metagabros da parte norte com relação aos metagabros do sul do complexo. No trabalho de Girelli *et al.* (2018), a idade U-Pb em zircão (LA-ICP-MS) sugere dois principais ciclos para o complexo, o primeiro entre 2.430 a 2.290 Ma com geração de crosta juvenil e o segundo entre 2.240 a 2.120 Ma com geração de crosta retrabalhada. A idade de 2.060 Ma é interpretada como do evento granulítico marcando a colisão continental de diferentes terrenos do Cráton Río de la Plata. Diques graníticos relacionados à extensão crustal ocorrem com idades de 1.8 Ga, cortando as rochas do complexo.

No complexo, os estudos isotópicos têm sido direcionados para geocronologia. Para estudos petrológicos, os dados são escassos. Soliani Jr. (1986) mostra razões iniciais de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em torno de 0,7019 a 0,7021, sugerindo uma contribuição mantélica como a principal fonte dos protólitos do complexo. Os dados Sm-Nd de Hartmann (1987) sugerem valores ϵNd positivos, com a razão inicial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ próxima de 0,510 para uma idade de 2,1 Ga. Já Girelli *et al.* (2016, 2018), com base em dados Lu-Hf, apresenta valores de $\epsilon\text{Hf}(t) = -3,17$ a $+7,00$ para as rochas relacionadas à unidade básica-ultrabásica, o magmatismo de arco de ilha, e $\epsilon\text{Hf}(t) = -4$ a $+2,4$ para as rochas relacionadas à unidade ácida-intermediária interpretadas como de acreção tardia do arco. Esses dados associados a idades de cristalização próximas às idades modelos de háfnio (T_{DM}) de 2,7 Ga indicam uma fonte juvenil para

os protólitos do magmatismo do complexo. Assim, todos os dados isotópicos sugerem que o manto foi a principal fonte para a geração dos protólitos do Complexo Granulítico Santa Maria Chico.

UFRGS (2015) realizou o mapeamento na região de Bagé e Dom Pedrito, RS, em escala 1:25.000 das rochas metamórficas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico. A partir deste trabalho, as rochas do complexo mostram uma dualidade que pode ser observada em diversos aspectos: I) algumas rochas registram condições de metamorfismo em fácies granulito enquanto outras em fácies anfibolito, II) alguns gnaisses registram estruturas deformacionais polifásicas enquanto outras rochas do complexo variam de maciças a incipientemente bandadas segundo a direção NW-SE, e III) há diferença composicional entre uma associação máfica-ultramáfica e uma associação de gnaisses tonalíticos-trondhjemíticos. Estas diferenças levaram UFRGS (2015) a sugerir que a unidade possa ser subdividida em, pelo menos, duas subunidades, denominadas Associação Máfico-Ultramáfica (AMU) e Associação Tonalítica-Trondhjemítica (ATT), redefinindo então sua denominação para Complexo Santa Maria Chico. Além disso, ainda identificam e individualizam rochas metasedimentares como parte desse complexo.

Em trabalhos complementares no complexo, UFRGS (2016, 2017, 2018) mapearam áreas distintas dessa unidade e mantêm a nomenclatura de COMPLEXO SANTA MARIA CHICO, sugerindo que as condições de metamorfismo e associação de campo são da unidade máfica-ultramáfica (AMU) e da associação tonalítica-trondhjemítica são diferentes, motivo que mantém a exclusão do termo granulítico do nome da unidade. Além da unidade paraderivada, esses trabalhos ainda identificam uma unidade granitoide tardia que afeta as rochas do complexo, os Granitoides Arroio do Salso, em geral milonitizados e associados a Zona de Cisalhamento Afonso Jacinto, estudados por Padilha (2016).

1.4 Materiais e métodos

As técnicas utilizadas para a resolução do problema de pesquisa foram estruturadas em etapas fundamentais, quais sejam o trabalho de campo, as análises

de laboratório e a interpretação e integração dos resultados, além da revisão bibliográfica, que permeia todas as etapas do trabalho.

O trabalho de campo teve duração de quinze dias na região Dom Pedrito, RS, principal de ocorrência do complexo. Os dados de UFRGS (2015) foram utilizados como referência para o trabalho. A área estudada corresponde às partes sudeste da folha Ibaré (SH.21-Z-B-VI-3) e nordeste da folha Vila Afonso Jacinto (SH.21-Z-D-III-1). Durante o campo, foram realizadas descrições macroscópicas das litologias, determinação das relações de campo entre elas quando possível e aquisição de acervo fotográfico; sobretudo, foram coletadas amostras, abrangendo todas as litologias ortoderivadas do complexo, sendo que vinte amostras foram encaminhadas para confecção de lâminas petrográficas, bem como preparadas para análise geoquímica de rocha total e análise isotópica (Sr e Nd).

Após as atividades de campo, foram selecionadas as amostras para as análises de laboratório, realizada a compilação das informações de campo e a digitalização dos croquis. Após seleção das amostras, estas foram lavadas e preparadas de acordo com a técnica que foi empregada.

As lâminas delgadas foram confeccionadas no laboratório de laminação do Núcleo de Preparação de Amostras (NPA) do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica do Instituto de Geociências (CPGq-IGEO-UFRGS), e então foram realizadas as descrições petrográficas utilizando-se microscópio óptico de luz transmitida, modelo *Leica DMLP*, com câmera fotográfica digital acoplada, modelo *Leica DC 300F* (Fig. 9) e lupa *Leica MZ 125* também com câmera digital acoplada, modelo *Canon PowerShot S50*.

A preparação das amostras para as análises químicas e isotópicas começou pela moagem, efetuada no Núcleo de Preparação de Amostras (NPA) do CPGq. As amostras foram trituradas e pulverizadas até um tamanho aproximado de 200 *mesh*, adequado para os procedimentos de análises em laboratório; i) britagem, inicialmente através de prensa; II) cominuição manual em gral de ágata até que se obtivesse uma fração aproximadamente areia grossa e III) moagem em moinho de bolas de ágata até (~200 *mesh*).

Após a moagem, uma fração (> 5g) foi separada para os estudos isotópicos, e cerca de 20 g encaminhado para o Laboratório de Análise Química de Rochas do CPGq, onde foram confeccionadas as pastilhas, prensadas e fundidas, que foram analisadas por espectrometria por fluorescência de raios-x (FRX) no espectrômetro

Rigaku® RIX2000. As análises isotópicas de Sr e Nd foram realizadas em vinte amostras no Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) do CPGq, em um espectrômetro de massas multi-coletor por ionização termal (TIMS – *Thermal Ionization Mass Spectrometer*) Triton em 20 amostras a fim de determinar razões isotópicas das rochas do Complexo Santa Maria Chico.

As amostras pulverizadas de rocha total (< 200 *mesh*) foram pesadas (0,1 g) em frascos de teflon (Savillex) e ainda na balança de precisão foram adicionadas 15 gotas de HNO₃ concentrado. Para a realização das análises de Sm-Nd foram adicionadas 100 µL de *spike* misto. As análises de Sr foram realizadas sem adição de *spikes*. Procedimentos específicos foram utilizados na dissolução total das amostras em chapa quente, com diferentes volumes e concentrações de HF, HNO₃ e HCl. Após a dissolução, as amostras foram diluídas em 3 mL de HCl 2,5 N e dispostas em tubos de ensaio de polipropileno.

A separação do Sr, Sm e Nd foi feita através de colunas preenchidas por resina de troca catiônica AG-50W-X8 (200-400 *mesh*) e aniônica LN-B50-A (100-150 µm) de acordo com procedimentos envolvendo HCl. As amostras de soluções individuais de Sr, Sm e Nd foram secas na chapa elétrica e depositadas com auxílio de 2 µL de H₃PO₄ 0,25 N para dissolução do resíduo sobre filamentos duplos de Rênio (Re). Os padrões utilizados para verificar a estabilidade do equipamento foram os padrões NIST NBS-987 para Sr e JNdi para Nd. Os brancos obtidos foram menores que 100 ng para Sr e Sm e menores que 60 ng para Nd.

O tratamento dos dados analíticos foi realizado através dos *softwares Microsoft Excel* e *GCDKit* (Janoušek *et al.*, 2006) para que, a partir das diferentes assinaturas geoquímicas e isotópicas das rochas analisadas, fossem elaborados cálculos e diagramas para auxiliar na interpretação dos dados.

A etapa final do trabalho consistiu na compilação, integração e interpretação dos dados e a elaboração da presente dissertação.

REFERÊNCIAS

- Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S. (1989). Geologia, Petrologia e Geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 19(2), 153-169.

- Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S. (2000). Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 186-189.
- Barbosa, N., Leal, A.B.M., Leal, L.R.B., Barbosa, N.S., Mercês, L.V., Marinho, M.M., Barbosa, J.S.F., Koproski, L.M. Debruyne, D. (2019). Paleoproterozoic to Paleoproterozoic crustal evolution in the Guanambi-Correntina (GCB), north São Francisco Craton, Brazil, unraveled by U-Pb Geochronology, Nd-Sr isotopes and geochemical constraints. *Precambrian Research*, 340, 1-15, 2019.
- Bastos, V.A., Koester, E., Lenz, C., Barbosa, L.D.O. (2020). Mineral chemistry and geothermobarometry of the SE Pinheiro Machado Complex: implications for the evolution of the eastern domain of the Dom Feliciano Belt, Brazil. *International Geology Review*, Submetido.
- Camozzato, E., Phillip, R.P., Laux, J.H., Nardi, L.V.S. (2013). Magmatismo Pós-colisional no Terreno Taquarembó: geologia e geoquímica das Suítes Santo Afonso, Saibro e Vauthier e Granito Passo da Chácara, RS. In: XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2013, Diamantina. SBGq.
- CPRM (2017). Geologia e recursos minerais da Folha Lagoa da Meia Lua, Escala 1:100.000. Porto Alegre, CPRM, Serviço Geológico do Brasil. 255p.
- CPRM (2019). Levantamento Geológico e do Potencial Mineral de Novas Fronteiras: Projeto Sudeste do Rio Grande do Sul: escalas 1:250.000 e 1:100.000, Estado do Rio Grande do Sul. CPRM.
- Fernandes, L.A.D., Menegat, R., Costa, A.F.U., Koester, E., Porcher, C.C., Tommasi, A., Kraemer, G., Ramgrab, G. E., Camozzato, E. (1995). Evolução Tectônica Do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-Rio-Grandense: Parte 1 - Uma Contribuição A Partir Do Registro Geológico. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4), 351–374.
- Formoso, M.L.L., Hartmann, L.A., Nardi, L.V.S. (1980). A Razão K/Rb em Anortositos e Rochas Granulíticas do Escudo Sulriograndense - Metassomatismo e Consequências Geocronológicas. In *XXXI Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 119–127). Balneário Camboriú.
- Fragoso Cesar, A.R., Soliani Jr., E. (1984). Compartimentação Tectônica do Cráton do Rio de La Plata. In *XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 2426–2434). Rio de Janeiro.
- Girelli, T.J., Chemale Jr., F., Lavina, E.L C., Lana, C., Laux, J.H. (2016). Novos dados de Geocronologia U-Pb e Lu-Hf para o Complexo Granulítico Santa Maria Chico - RS. In *48o Congresso Brasileiro de Geologia*. Porto Alegre.
- Girelli, T.J., Chemale Jr., F., Lavina, E.L C., Laux, J.H., Bongioiolo, E.M., Lana, C. (2016). Granulite accretion to Rio de La Plata Craton, based on zircon U-Pb-Hf isotopes: tectonic implications for Columbia Supercontinent reconstruction. *Gondwana Research*, 56, 105-118.

- Gregory, T.R., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Florisbal, L.M., Chemale Jr., F. (2015). Geochronological data from TTG-type rock associations of the Arroio dos Ratos Complex and implications for crustal evolution of southernmost Brazil in Paleoproterozoic times. *Journal of South American Earth Sciences*, 57:49-60
- Hartmann, L.A. (1987). Isócrona Sm-Nd de 2,1Ga em Minerais de Duas Amostras do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS. In *I Congresso Brasileiro de Geoquímica* (pp. 105–111). Porto Alegre.
- Hartmann, L.A. (1988). Geoquímica de Terras Raras e Geotermobarometria de Granulitos De Dom Pedrito e Luis Alves, No Extremo Sul Do Brasil. *Geochimica Brasiliensis*, 2(1), 1–14.
- Hartmann, L.A. (1991). Condições De Metamorfismo No Complexo Granulítico Santa Maria Chico , Rs. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(2), 107–113.
- Hartmann, L.A. (1998). Deepest exposed crust of Brazil - Geochemistry of paleoproterozoic depleted Santa Maria Chico granulites. *Gondwana Research*, 1(3–4), 331–341.
- Hartmann, L.A., Leite, J.A.D., da Silva, L.C., Remus, M.V.D., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Santos, J.O.S., Vasconcellos, M.A.Z. (2000). Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47, 829–844.
- Hartmann, L.A., Leite, J.A.D., McNaughton, N.J., Santos, J.O.S. (1999). Deepest exposed crust of Brazil-SHRIMP establishes three events. *Geology*, 27(10), 947–950.
- Hartmann, L.A., Liu, D., Wang, Y., Massonne, H.J., Santos, J.O.S. (2008). Protolith age of Santa Maria Chico granulites dated on zircons from an associated amphibolite-facies granodiorite in southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 80(3), 543–551.
- Hartmann, L.A., Nardi, L.V.S. (1980). O Cinturão Granulítico Atlântico nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Acta Geologica Leopoldensia*, 4(12), 3–12.
- Hartmann, L.A., Nardi, L.V.S. (1983). Contribuição À Geologia da Região Oeste do Escudo Sul-Rio-Grandense. In *I Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia* (pp. 09–18). Porto Alegre.
- Hartmann, L.A., Porcher, C.C, Remus, M.V.D. (2000). Evolução das Rochas Metamórficas do Rio Grande do Sul. In M. Holz e L. F. de Ros (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul* (pp. 79–118). Porto Alegre: CIGO/UFRGS.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A.C., Campos Neto, M., Silva, L.C., Trouw, R.A.J., Janasi, V.C., (2004). A Província Mantiqueira: In V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro e B.B. Brito Neves (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (pp. 203-234). Editora BECA.
- Jacobsen, S.B., Wasserburg, G.J. (1980). Sm-Nd Isotopic Evolution of Chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 50, 139–155.

- Janousek, V., Farrow, C.M., Erban, V. 2006. Interpretation of wholerock Geochemical Data in Igneous Geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCD kit). *Journal of Petrology*, 47(6):1255-1259.
- Koester, E., Soliani Jr, E., Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., Fernandes, L.A.D., McNaughton, N.J., Santos, J.O.S., Oliveira, L.D. (2001). SHRIMP U-Pb age for the emplacement of the Santana Granite and reactivation of the Porto Alegre Suture, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 14, 91-99.
- Kraemer, G. (1995). Evolução magmática e tectônica da Suíte Ortometamórfica Imbicuí, região de Lavras do Sul (RS). Porto Alegre. 99p. (Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul).
- Laux, J. H., Bongioiolo, E. M., Chemale Jr., F., Gross, A. O. M. da S., Santos, T. C. dos. (2010). Reavaliação da idade do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS. In 45o Congresso Brasileiro de Geologia (p. 55). Belém.
- Laux, J.H., Bongioiolo, E.M. (2011). Geoquímica do Complexo Granulítico Santa Maria Chico: Arco de Ilha Proterozóico no Rio Grande do Sul. In *XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica* (pp. 744–747). Gramado, RS.
- Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J., Chemale Jr., F., 1998. SHRIMP U/Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost Brazil. *International Geology. Review*. 40, 688–705.
- Lenz, C., Porcher, C.C., Fernandes, L.A.D., Masquelin, H., Koester, E., Conceição, R.V. (2012). Geochemistry of the Neoproterozoic (800 - 767 Ma) Cerro Bori orthogneisses, Dom Feliciano belt in Uruguay: tectonic evolution of an ancient continental arc. *Mineral. Petrol.* 1, 10.
- Masquelin H., Fernandes L.A.D., Lenz C., McNaughton N.J., Porcher C.C. 2012. The Cerro Olivo complex: a Pre-Collisional Neoproterozoic Magmatic Arc in Eastern Uruguay. *International Geology Review*, 54(10):1161-1183.
- McCulloch, M. T., Bradshaw, J. Y., Taylor, S. R. (1987). Sm-Nd and Rb-Sr isotopic and geochemical systematics in Phanerozoic granulites from Fiordland, southwest New Zealand. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97(2), 183–195.
- Nardi, L.V.S., Hartmann, L.A. (1979). O Complexo Granulítico Santa Maria Chico do Escudo Sulriograndense. *Acta Geologica Leopoldensia*.
- Nardi, L.V.S., Hartmann, L.A. (1980). Estudo Geoquímico de Rochas Granulíticas do Oeste do Escudo Sulriograndense. *Acta Geologica Leopoldensia*, 4(11), 3–18.
- Nardi, L.V.S., Plá Cid, J., Bitencourt, M.F., Stabel, L.Z. (2008). Geochemistry and petrogenesis of post-collisional ultrapotassic syenites and granites from southernmost Brazil: the Piquiri Syenite Massif. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (80), 353-371.

- Padilha, J.F. (2016). *A Zona de Cisalhamento Afonso Jacinto: definição, reconstrução cinemática e importância no arcabouço estrutural do Complexo Santa Maria Chico, RS*. Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 76 p.
- Paim P.S.G., Chemale Jr., F., Lopes, C. (2000). A Bacia do Camaquã. In M. Holz e L. F. de Ros (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul* (pp. 231–274). Porto Alegre: CIGO/UFRGS.
- Peel, E., Sánchez-Bettucci, L., 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). *J. South Am. Earth Sci.* 85, 250–262.
- Philipp, R.P., 1998. A evolução geológica e tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, pp. 255p.
- Philipp, R.P., Campos, R.S., 2004. Geologia, petrográfica e litogeoquímica dos Gnaisses Porto Alegre, RS, Brasil: implicações geotectônicas. *Pesquisas em Geociências* 31 (2), 79–94.
- Philipp, R.P., Girelli, T., Lopes, R. C., Sander, A., Lavina, E. L. C. (2015). Petrografia e Litogeoquímica Do Complexo Granulítico Santa Maria Chico Na Região De Fontouras, Dom Pedrito/RS. In *IX Simpósio Sul-Brasileiro De Geologia*. Florianópolis.
- Porcher, C.C., McNaughton, N.J., Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., Fernandes, L.A.D., 1999. Idade SHRIMP em zircão: vulcanismo ácido do Complexo Metamórfico Porongos. In: *I Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados*, Gramado. Abstracts, pp. 110.
- Ramos, R.C., Koester, E., Vieira, D.T., Porcher, C.C., Gezatt, J.N., Silveira, R.L. (2018). Insights on the evolution of the Arroio grande ophiolite (Dom Feliciano belt, Brazil) from Rb-Sr and SHRIMP U-Pb isotopic geochemistry. *J. South Am. Earth Sci.* 86, 38–53.
- Rass, I.T., Aranovich, L.Y., Korpechkov, D.I., Kozlovskii, V.M. (2014). Geochemistry of metamorphic processes in mafic rocks of the Krasnaya Guba area, Belomorian Mobile Belt. *Geochemistry International*, 52(8), 670–686.
- 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.
- Silva, R. (2016). O granito capão do leão: magmatismo Tipo-I altamente fracionado no sudeste do Cinturão Dom Feliciano, RS. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 75 p.
- Soliani Jr., E. (1986). *Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 548 p.

- Soliani Jr., E., Fragoso Cesar, A.R., Teixeira, W., Kawashita, K. (1984). Panorama Geocronológico da Porção Meridional do Escudo Atlântico. In *XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 2435–2449). Rio de Janeiro.
- Tickyj, H., Hartmann, L.A., Vasconcellos, M.A.Z., Philipp, R.P., Remus, M.V.D. (2004). Electron microprobe dating of monazite substantiates ages of major geological events in the southern Brazilian shield. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(8), 699–713.
- Tomson, J.K., Bashkar Rao, Y.J., Vijaya Kumar, T., Choudhary, A.K. (2013). Geochemistry and neodymium model ages of Precambrian charnockites, Southern Granulite Terrain, India: Constraints on terrain assembly. *Precambrian Research*, (227), 295-315.
- UFRGS. (2015). *Mapa geológico de parte das folhas Vila Afonso Jacinto e Ibaré* (Mapa e Relatório Técnico). Porto Alegre.
- Wildner, W., Ramgrab, G.E., Lopes, R.C., Iglesias, C.M.F. (2006). Mapa Geológico do Rio Grande do Sul. CPRM.

PARTE II

Isótopos de Sr e Nd na evolução do Complexo Santa Maria Chico, Cráton Ríó de la Plata, Sul do Brasil

Sr and Nr isotopic constraints in the evolution of the Santa Maria Chico Complex, Ríó de la Plata Craton, South Brazil

Willian Pedroso Moraes ^{a,*}, Edinei Koester ^b, Daniel Triboli Vieira ^a

^a Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PO Box 15001, zip code 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil E-mail: wilmoraes@gmail.com, danieltriboli@hotmail.com

^b Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Avenue, 9500, zip code 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: koester@ufrgs.br

Abstract

This paper focuses on Sr and Nd isotopic constraints in the orthoderived rocks from Santa Maria Chico Complex, westernmost Ríó de la Plata Craton, Brazil. This complex comprises a set of high-grade metamorphic rocks of Paleoproterozoic age split in i) mafic-ultramafic association (AMU) with metaultramafites, granulites, gabbroic to anorthositic gneisses (granulite facies); ii) tonalitic-trondhjemitic association (ATT) present also granitic gneisses subordinately (amphibolite facies), and iii) paraderived association (PA) with quartzofeldspathic gneiss, sillimanite gneiss and subordinately marbles, quartzite and BIF. The AMU present a tholeiitic signature, with low contents of SiO₂ and high contents of MgO, enrichment in LILE and depletion in HFSE in relation to the primitive mantle, with fractional crystallization and low amounts of crustal assimilations as the main magmatic process. Isotopic features suggest a mantle derived related association with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ 0.700924 to 0.704864; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ 0.509903 to 0.510096; $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ -0.29 a 3.49 and T_{DM} , 2.1 to 2.4 Ga. The ATT present a calc-alkaline signature, more evolved in SiO₂ contents when compare to AMU and also present enrichment in LILE as well as HFSE elements in relation to the primitive mantle, with fractional crystallization and distinct crustal assimilations compared to AMU. Isotopic features also suggest a mantle derived association with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ 0.701254 to 0.708815; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ 0.511022 to 0.512171; $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ -3.71 to 2.17 and T_{DM} 2.3 to 2.6 Ga. Source of this magmatism for both associations (MUA and TTA) are envisaged as melting of similar to actual primitive mantle, plus a continental crust with isotopic ratios similar to paraderived association, taking place, respectively, around 2.4 and 2.1 Ga, representing an island arc and an evolved continental arc environment in the Craton Ríó de la Plata.

Keywords. Sul-rio-grandense Shield, Sr-Nd isotopes, source, primitive mantle, granulite, amphibolite.

Resumo

Este artigo discute dados isotópicos de Sr e Nd para as rochas ortoderivadas do Complexo Santa Maria Chico, no extremo oeste do Cráton Río de la Plata, Brasil. Este complexo compreende um conjunto de rochas metamórficas de alto grau de idade paleoproterozoica divididas em i) associação máfica-ultramáfica (AMU) com metaultramafitos, granulitos, gnaiss gabroico a anortosítico (metamorfismo de fácies granulito); ii) a associação tonalítico-trondhjemítica (ATT) que apresenta ainda gnaisses graníticos subordinados (metamorfismo de fácies anfíbolito); e iii) associação paraderivada (AP) com gnaiss quartzo-feldspático, silimanita gnaiss e subordinadamente, mármore, quartzito e BIFs. A AMU apresenta uma assinatura toleítica, com baixos teores de SiO₂ e altos teores de MgO, enriquecimento em LILE e depleção nos HFSE em relação ao manto primitivo, com cristalização fracionada e baixas quantidades de assimilações crustais como principal processo magmático. Características isotópicas sugerem uma associação de derivação do manto com $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ 0,700924 a 0,704864; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ 0,509903 a 0,510096; $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ -0,29 a 3,49 e T_{DM} , 2,1 a 2,4 Ga. O ATT apresenta uma assinatura cálcio-alcalino, mais evoluída nos conteúdos de SiO₂ quando comparada à AMU e também apresenta enriquecimento em LILE bem como de elementos do HFSE em relação ao manto primitivo, com cristalização fracionada e assimilações crustais sendo o processo de diferenciação, porém com fontes distintas em comparação à AMU. As assinaturas isotópicas também sugerem uma associação derivada do manto com $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ 0,701254 a 0,708815; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ 0,511022 a 0,512171; $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ -3,71 a 2,17 e T_{DM} 2,3 a 2,6 Ga. A fonte desse magmatismo para ambas as associações (AMU e ATT) é considerada como fusão de manto primitivo semelhante ao manto primitivo, com a participação de crosta continental com razões isotópicas similares a associação paraderivadas, ocorrendo em ambientes dos arcos de ilha que evoluíram para arcos continentais no Cráton Río de la Plata, respectivamente, entre 2,4 e 2,1 Ga.

Palavras-chave: Escudo Sul-rio-grandense; isótopos de Sr-Nd, fontes, manto primitivo, granulito, anfíbolito.

1. Introdução

Isótopos radiogênicos são ferramentas significativas para entender os processos relacionados à evolução de rochas do manto e da crosta amplamente utilizados em estudos petrológicos, uma vez que os elementos respondem de maneiras específicas a processos geológicos particulares no interior da Terra, atuando como indicadores petrogenéticos (Faure e Mensing, 2005; Gill, 2010; Rollinson, 2014). As medidas de razões isotópicas fornecem informações importantes sobre a origem dos protólitos e processos que ocorrem durante a evolução e a cristalização do magma, mesmo aqueles que posteriormente passaram por metamorfismo de alto grau (Rass *et al.*, 2014).

O Complexo Santa Maria Chico (CSMC) é formado por rochas metamórficas paleoproterozoicas de alto grau, metamorfizadas em fácies granulito e

retrometamorfizado em fácies anfíbolito a xisto verde, situadas no sudoeste do Escudo Sul-rio-grandense, sendo considerado um fragmento norte do Cráton do Río de la Plata no sul do Brasil (Nardi e Hartmann, 1979; Hartmann *et al.*, 2008; Girelli *et al.*, 2018). Embora estudos anteriores tenham estabelecido as características do Complexo Santa Maria Chico em termos de petrografia, geoquímica e geocronologia (Nardi e Hartmann, 1979, 1980; Hartmann e Nardi, 1980; Formoso *et al.*, 1980; Fragozo Cesar e Soliani Jr., 1984; Soliani Jr. *et al.*, 1984; Soliani Jr., 1986; Hartmann, 1987, 1988, 1991, 1998; Hartmann *et al.*, 1999; 2000a; Tickyj *et al.*, 2004; Laux *et al.*, 2010; Laux e Bongioiolo, 2011; CPRM, 2012, 2014a, 2014b, 2017; Girelli *et al.*, 2016, 2018) os dados isotópicos que discutem aspectos petrológicos ainda são escassos, porém importantes em discussões recentes sobre o Complexo. A partir de critérios de campo, como controle estrutural, e mineralógicos como de minerais e texturas de fácies granulito em todas as rochas do complexo, as discussões recentes postulam que o complexo possa ser individualizados em duas subunidades separadas, uma metamorfizada em fácies granulito e outra metamorfizada em fácies anfíbolito (UFRGS, 2015, 2016, 2017, 2018).

Assim, neste artigo, são apresentados dados de geoquímica de rocha total e isótopos de Sr-Nd em rochas ortoderivadas do Complexo Santa Maria Chico, com a intenção de testar se essa individualização em duas subunidades é suportada pelo aspecto geoquímico e, ainda, identificar possíveis processos magmáticos e fontes e implicados na gênese dos protólitos do Complexo.

2. Contexto geológico

A área de estudo, está localizada na porção oeste do Rio Grande do Sul, próximos aos municípios de Bagé e Dom Pedrito e está inserida no contexto geológico do Escudo Sul-rio-grandense (Fig. 1).

O Escudo Sul-rio-grandense pode ser dividido em uma área cratônica, o Cráton Río de la Plata, e o Cinturão Dom Feliciano, que por sua vez é dividido em quatro domínios/terrenos: a) Domínio Ocidental, Oeste ou Terreno Vila Nova; b) Domínio Central ou Terreno Tijucas; c) Domínio Oriental, Leste ou Batólito Pelotas; e d) Domínio Sudeste ou Terreno Punta del Este.

O Cráton Río de la Plata é encontrado no sudoeste do Escudo Sul-rio-grandense, onde é representado pelas rochas paleoproterozoicas do Complexo (Granulítico) Santa Maria Chico, interpretado como o registro de um arco magmático de 2,4 Ga (Nardi e

Hartmann, 1979; Girelli *et al.*, 2018). A extensão geográfica, bem como evolução geotectônica do Cráton Río de la Plata têm sido amplamente discutidas na literatura, *e.g.* limite do Cráton (Oyhantçabal *et al.*, 2011; Favetto *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2017), e evolução tectônica (Rapela *et al.*, 2011; Gaucher *et al.*, 2011).

As demais unidades do escudo correspondem ao Cinturão Dom Feliciano, em geral com unidades geológicas de idades neoproterozoicas, que foi dividido em quatro domínios (terrenos, blocos, e/ou batólito), baseado em critérios geológicos e geofísicos (Fernandes *et al.*, 1995; Costa, 1997; Ramos *et al.*, 2014; Hartmann *et al.*, 2016; CPRM, 2019): domínio oeste com o predomínio de rochas ígneas e metamórficas relacionadas a dois arcos magmáticos e fragmentos de rochas de assoalho oceânico e bacias associadas (Silva Filho e Soliani Jr., 1989; Kraemer, 1995; Leite *et al.*, 1998), central com predomínio de rochas metassedimentares vinculadas a bacias de *back-arc* e/ou *forearc*, bem como fragmentos de rochas paleoproterozoicas ortoderivadas (Porcher *et al.*, 1999; Remus *et al.*, 2002; Philipp *et al.*, 2004; Gregory *et al.*, 2015), leste com predomínio de rochas graníticas criogenianas relacionadas a um arco magmático e/ou pós-colisionais e intenso magmatismo vinculado a zonas de cisalhamento (Philipp, 1998; Koester *et al.*, 2002; Bitencourt e Nardi, 2002) e sudeste, formado por rochas metassedimentares vinculadas a bacias de *back-arc* e/ou *forearc*, bem como fragmentos de rochas de assoalho oceânico e rochas neoproterozoicas tonianas orto e paraderivadas vinculadas a um arco magmático (Lenz *et al.*, 2012; Peel *et al.*, 2018; Ramos *et al.*, 2018; CPRM, 2019).

No final do neoproterozoico e início do cambriano ocorre a deposição da Bacia do Camaquã, representado por expressiva sedimentação e vulcanismo na porção centro-oeste do escudo (Paim *et al.*, 2000), bem como concomitante intrusão de diversos corpos plutônicos que ocorrem de forma sistemática em todo o Escudo Sul-rio-grandense, que já se encontrava amalgamado.

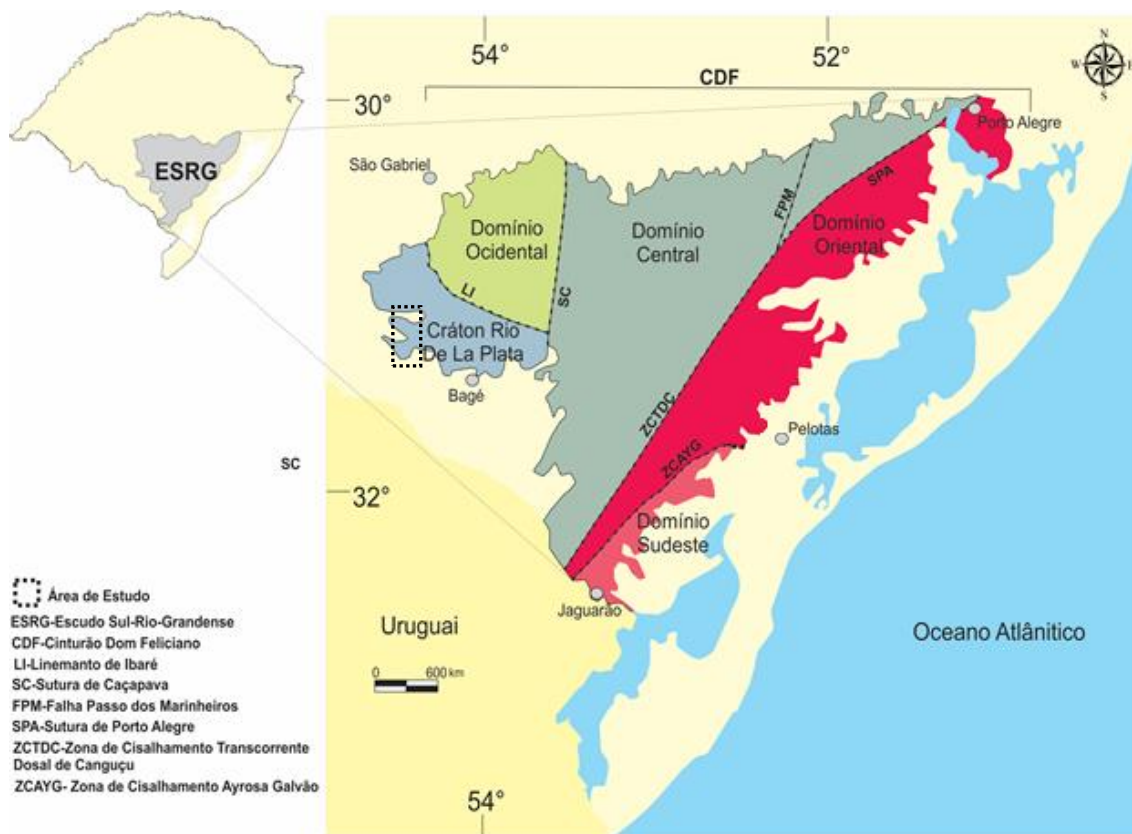


Figura 1. Mapa do Escudo Sul-rio-grandense com as principais divisões geotectônicas, seus limites e a localização da área de estudo (retângulo tracejado, em detalhe na Figura 2) no contexto geológico.

O Complexo Granulítico Santa Maria Chico (Nardi e Hartmann, 1979) ocorre no oeste do Escudo Sul-rio-grandense (Fig. 2) e consiste em um conjunto de rochas metamórficas de alto grau composto principalmente por gnaisses quartzo-feldspáticos, granulitos, gnaisses básicos, ultramafitos e subordinadamente por metanortositos, silimanita gnaisse, mármores, quartzitos, BIFs e gnaisses calcissilicático. Em termos de estrutura, o complexo é em geral maciço, por vezes com foliação metamórfica de orientação principal NW-SE e alto ângulo de mergulho (Philipp *et al.*, 2015; UFRGS, 2015, 2016).

Essas rochas variam de maciças a bandadas, em geral com textura granoblástica fina a média, localmente grossa, compostas por plagioclásio (An_{30-50}), quartzo, pouco ou nenhum K-feldspato, hiperstênio, diopsídio e hornblenda; biotita, actinolita, clorita e epidoto indicam um retrometamorfismo. Nos ultramafitos e anortositos predominam o hiperstênio, diopsídio, hornblenda, espinélio verde e/ou plagioclásio (An_{50}). O hiperstênio apresenta texturas de corona, indicando reações de alta temperatura com diopsídio e hornblenda e reações de baixa temperatura com talco e actinolita (Hartmann, 1991).

Hartmann *et al.* (2000b) resume o metamorfismo em quatro eventos principais: M1, pré-tectônico, paragênese, dada por opx + cpx + plag + ilm / mag; M2, sin-tectônico paragênese fácies de granulito opx + cpx + plag + grt + hbl + bt + ilm / mag + qz; M3 retrometamorfismo de contato causado por intrusões graníticas neoproterozoicas com paragênese anf + chl + tlc + ep; M4 ocorrendo localmente ao longo de zonas de cisalhamento e fraturas, paragênese com ep + chl + microclínio.

A partir de dados de campo, estruturais e petrográficos, o Complexo Granulítico Santa Maria Chico tem sido dividido em três subunidades (Fig. 2), com base principalmente na natureza de seus protólitos e relações de campo, como relações de corte: i) uma unidade ortoderivada mais antiga de composição ultramáfica a máfica; ii) uma unidade ortoderivada mais jovem de composição félsica; iii) uma unidade paraderivada (UFRGS, 2015, 2016, 2017, 2018; CPRM, 2017; Girelli *et al.*, 2018). As nomenclaturas para essas subunidades variam, em geral se sobrepondo em termos geológicos, por exemplo, Associação Máfica-ultramáfica (AMU, UFRGS, 2015), Unidade Ortoderivada Máfica (CPRM, 2017) ou *Basic-ultrabasic unit* (BUU, Girelli *et al.*, 2018) e Associação tonalítica-trondhjemítica (ATT, UFRGS, 2015), Unidade Ortoderivada Granítica (CPRM, 2017) ou *Acid-intermediate unit* (AIU, Girelli *et al.*, 2018).

As primeiras idades do complexo foram obtidas a partir de diagramas isocrônicos Rb-Sr (Soliani Jr., 1986) que propõem duas idades paleoproterozoicas para o magmatismo do complexo, $2,03 \text{ Ga} \pm 73 \text{ Ma}$ e $1,98 \text{ Ga} \pm 266 \text{ Ma}$. Desde então, diversos autores tem proposto idades paleoproterozoicas para o protólito e metamorfismo do complexo (Hartmann, 1987; Hartmann *et al.*, 1999, 2000; Tickyj *et al.*, 2004; Laux *et al.*, 2010). Girelli *et al.* (2016) apresentam dados de U-Pb em zircão para cinco amostras da unidade máfica-ultramáfica, encontrando idades de cristalização entre 2.173 ± 20 e $2.413 \pm 13 \text{ Ma}$, no que os autores ressaltam uma diferença de 250-200 Ma na idade de cristalização dos metagabros da parte norte com relação aos metagabros do sul do complexo. No trabalho de Girelli *et al.* (2018) a idade U-Pb em zircão (LA-ICP-MS) sugere dois principais ciclos para o Complexo, o primeiro entre 2.430 a 2.290 Ma com geração de crosta juvenil e o segundo entre 2.240 a 2.120 Ma com geração de crosta retrabalhada. A idade de 2.060 Ma é interpretada como do evento granulítico marcando a colisão continental de diferentes terrenos do Cráton Río de la Plata. Diques graníticos relacionados a extensão crustal ocorrem com idades de 1,8 Ga, cortando as rochas do complexo.

CPRM (2017) realizou o primeiro estudo geoquímico detalhado do complexo e propõe que a Unidade Ortoderivada Máfica tem dois grupos de afinidades, uma cálcico-alcalino e outro toleítico, sugerindo que essa unidade represente basaltos do tipo MORB formados em ambientes de arcos de ilha e intraplacas. Por sua vez a unidade ortoderivada granítica tem afinidade cálcico-alcalina a toleítica com rochas formadas em ambientes de arco de ilhas. Nesse mesmo enfoque, Girelli *et al.* (2018) propõem que as rochas ortoderivadas do complexo foram geradas, em um primeiro momento, em ambiente de arco de ilha que foram consumidos e com o fechamento da crosta oceânica evoluíram para um arco continental.

Assim, os estudos das rochas paleoproterozoicas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico foram detalhadas em mapas na escala 1:25.000 por UFRGS (2015, 2016, 2017, 2018) onde é proposta a remoção do termo “granulítico” do nome do complexo, tendo como critério que as rochas da associação máfica-ultramáfica da AMU são as únicas rochas ortoderivadas que apresentam o metamorfismo de fácies granulito, enquanto que as rochas da associação tonalítica-trondhjemítica apresentam apenas evidências de metamorfismo de fácies anfibolito, propondo assim a denominação Complexo Santa Maria Chico, com a inclusão de uma subunidade ortoderivada metamorfizada em fácies granulito e de uma subunidade ortoderivada metamorfizada em fácies anfibolito, além da subunidade paraderivada, também metamorfizada em fácies granulito.

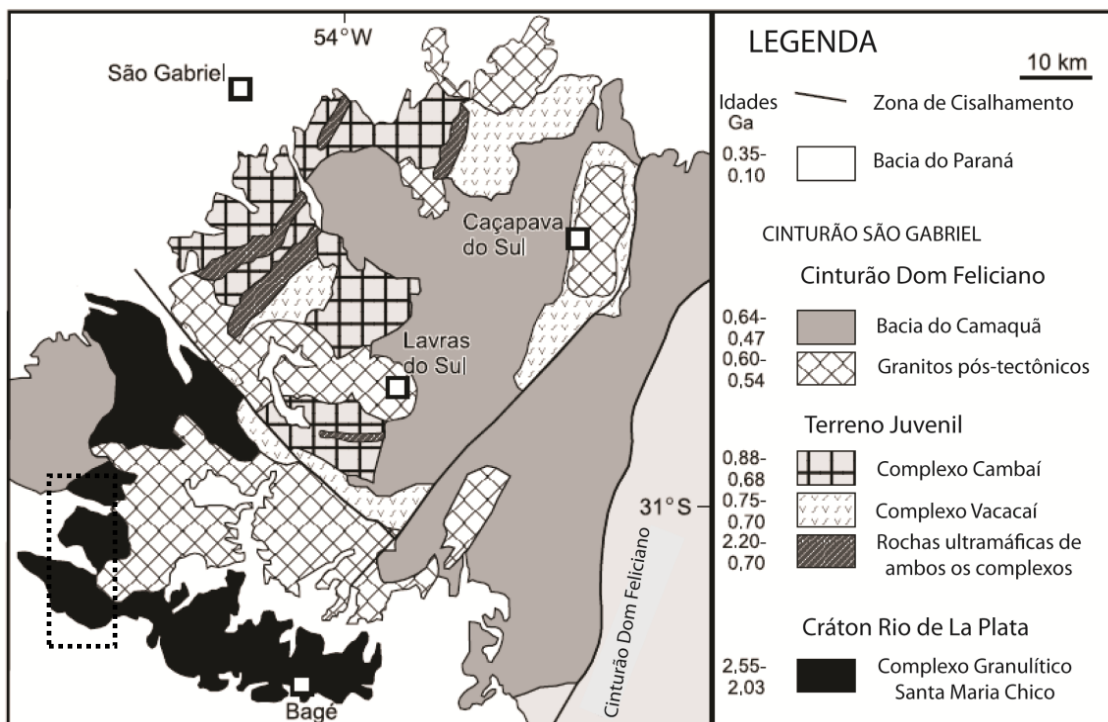


Figura 2. Mapa geológico esquemático da área de ocorrência do Complexo Granulítico Santa Maria Chico na porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense. Retângulo tracejado indica a área de estudo, em detalhe na Figura 3. Modificado de Hartmann *et al.* (2008).

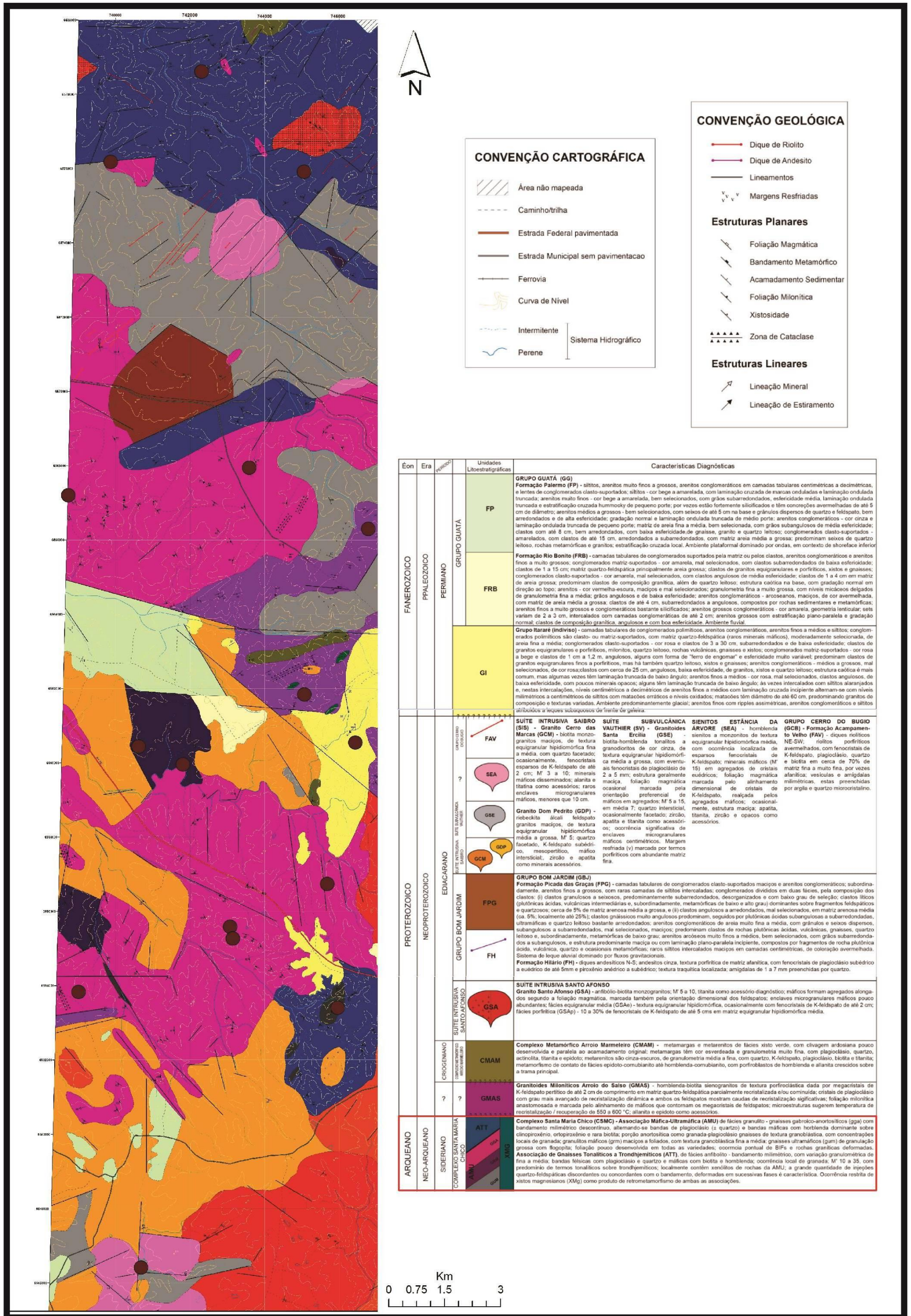


Figura 3. Mapa geológico de parte do Complexo Santa Maria Chico, sudoeste do Escudo Sul-rio-grandense, com a indicação do local de amostragem das análises petrográficas, geoquímicas e isotópicas (círculos). Modificado de UFRGS (2015).

3. Materiais e métodos

A etapa de campo destinou-se à coleta de dados das rochas do Complexo, envolvendo o reconhecimento de texturas e estruturas presentes em macro e meso-escala, bem como realizada a coleta sistemática de amostras representativas para confecção de lâminas petrográficas e análises isotópicas. Vinte amostras de rochas ortoderivadas do complexo, sendo apenas duas amostras de rochas paraderivadas, foram selecionadas para as análises geoquímicas de rochas total e isotópicas Sr-Nd, realizadas no Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq) do Instituto de Geociências (IGeo) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), respectivamente, por Fluorescência de raios X no Laboratório de Geoquímica (LGeoq) e por espectrometria de massas no Laboratório de Geologia Isotópica (LGI).

As amostras de rocha total foram pulverizadas (< 200 *mesh*), e após foram preparadas pastilhas fundidas e prensadas para as análises de rocha total de elementos maiores e traço, analisadas em um equipamento Rigaku® RIX2000, sendo que a geração dos gráficos geoquímicos foi realizada utilizando o *software* GCDKit (Janousek *et al.*, 2006).

Para os estudos isotópicos foram pesadas (0,1 g) em frascos de teflon (*Savillex*®) e ainda na balança de precisão foram adicionadas 15 gotas de HNO₃ concentrado. Para a realização das análises de Sm-Nd foram adicionadas 100 µL de *spike* misto, as análises de Sr foram realizadas sem adição de *spikes*. Procedimentos específicos foram utilizados na dissolução total das amostras em chapa quente, com diferentes volumes e concentrações de HF, HNO₃ e HCl. Após a dissolução, as amostras foram diluídas em 3 mL de HCl 2,5 N e dispostas em tubos de ensaio de polipropileno.

A separação de Sr, Sm e Nd foi feita através de colunas cromatográficas preenchidas por resina de troca catiônica Bio Rad AG-50W-X8 (200-400 *mesh*) e aniônica Eichrom LN-B50-S (50-100 µm) de acordo com procedimentos envolvendo HCl. As amostras de soluções individuais de Sr, Sm e Nd foram secas em chapa elétrica aquecida e depositadas com auxílio de 2 µL de H₃PO₄ 0,25 N para dissolução do resíduo sobre filamentos duplos de Rênio (Re). As análises isotópicas foram geradas utilizando-se um espectrômetro de massa multicoletor *Thermo Fisher TRITON™ Plus - Thermal Ionization Mass Spectrometry* (TIMS), utilizando coletores *Faraday* no modo estático. As razões de Nd e Sr foram normalizadas para ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0,7219 e ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0,1194, respectivamente. A razão ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr foi calculada a partir da concentração elementar do

Rb e Sr. Os padrões utilizados para verificar a estabilidade do equipamento foram os padrões NIST NBS-987 para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710260 \pm 0,000014$, e JNdi para $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,511859 \pm 0,000010$. Os brancos obtidos foram menores que 100 ng para Sr e Sm e menores que 60 ng para Nd. Os cálculos de razões isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ inicial para todas amostras foram calculados utilizando a idade de 2,1 Ga (Girelli *et al.*, 2018).

4. Resultados

Com base nos dados de campo, as amostras foram classificadas adotando a nomenclatura estabelecida por UFRGS (2015) onde os metaultramafitos, granulitos, gnaisses gabroicos e metanortositos são atribuídos a AMU (associação máfica-ultramáfica) enquanto que os gnaisses tonalíticos, trondhjemíticos e graníticos são atribuídos a ATT (associação tonalítica-trondhjemítica), além dessas, apenas duas amostras da subunidade paraderivada (Associação Paraderivada - AP), de gnaisses calcissilicáticos, foram estudadas para comparação sob ponto de vista geoquímico e isotópico.

A AMU é representada por ultramafitos, granulitos, gnaisses gabroicos e anortositos (Fig. 4a, b, c) sendo em geral maciços, por vezes com foliação orientada para NW-SE e inclinação de 40° a 85°, pouco deformados, com textura granoblástica fina a média, raramente grossa.

A ATT é intensamente deformada, composta por gnaisses tonalíticos e trondhjemíticos e subordinadamente graníticos (Fig. 5d, e, f), em geral foliados com orientação NW-SE, textura granoblástica média, e nematoblástica marcada pelos anfíbolios. Localmente, ocorrem lentes ultramáficas (anfíbolitos) de até um metro em corpos de gnaiss tonalítico, indicando a existência de dois protólitos distintos. O gnaiss granítico é observado como intrusão no gnaiss tonalítico, com estruturas ora concordantes, ora discordantes. Por vezes, os gnaisses graníticos encontram-se milonitizados (Padilha *et al.*, 2019).

O gnaiss calcissilicático apresenta bandas composicionais, dadas por níveis de quartzo + plagioclásio com um a três centímetros de espessura, e bandas mais finas (< 1cm de espessura) compostas por porfiroblastos de granada de até 2 mm de largura e matriz cinza fina indistinguível ao microscópio.

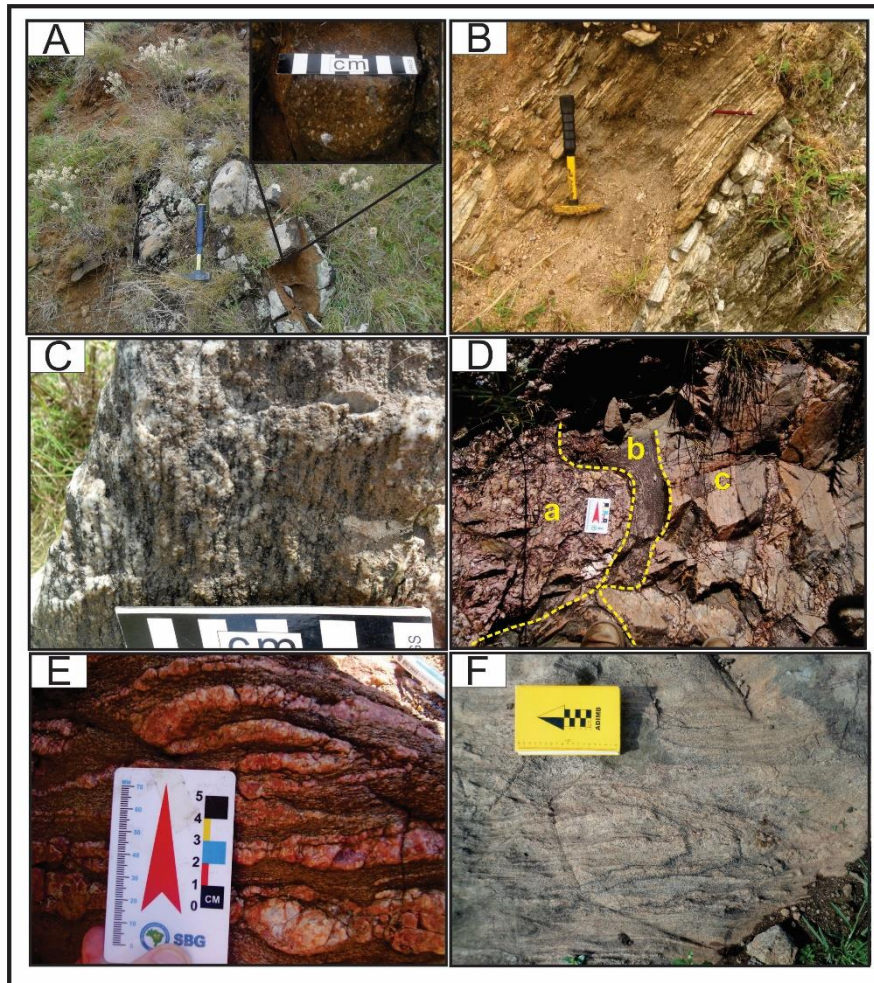


Figura 4. Fotografias de afloramentos do Complexo Santa Maria Chico, exibindo estilo de afloramento e ressaltando feições estruturais e texturais de meso-escala. A) Ultramafito *in situ* e em detalhe; apesar de maciço, percebe-se um plano preferencial de fratura; B) Gnaiss anortosítico *in situ*, com a típica foliação NW de alto mergulho; C) Gnaiss gabroico *in situ*, neste caso com granulação média e mergulho praticamente vertical; D) Contato entre gnaiss granítico (a) e tonalítico (b e c) na forma de “intrusão”; E) Gnaiss granítico ressaltando a intensa deformação na forma de dobras; F) Gnaiss tonalítico *in situ*, exibindo diversas fases de dobramento, diferentemente das rochas pertencentes a AMU.

As rochas ultramáficas têm hiperstênio e ortoanfibólio, que juntos representam 80% em volume; o plagioclásio ocorre como porfiroblastos e a matriz é granoblástica. O anfibolito é composto de plagioclásio e óxidos, com clinopiroxênio transformado para hornblenda e actinolita, em geral granoblásticos. As rochas máficas da AMU apresentam a composição mineralógica essencial de plagioclásio, hornblenda, hiperstênio, diopsídio e quartzo (< 7 %) com opacos, zircão e apatita como acessórios comuns. Variações texturais são dependentes da composição mineral, variando de granoblástica a nematoblástica (Fig. 5a, b) e reação em que a hornblenda aparece nas bordas do piroxênio (orto e clino) são comuns. A hornblenda é geralmente o mineral máfico dominante, enquanto orto e o clinopiroxênio ocorrem, por vezes, com lamelas de exsolução. A

presença de plagioclásio + hiperstênio indica metamorfismo em fácies de granulito, com anfibólio como um produto do retrometamorfismo de ortopiroxênio. A hornblenda + actinolita (Fig. 5c, d) circundando piroxênios é o registro da obliteração do metamorfismo de fácies granulito. O plagioclásio com textura granoblástica pode variar de 50% a 90% (Fig. 5e) em volume. As rochas gabroicas e anortosíticas apresentam uma paragênese de fácies granulito definida por plagioclásio + hiperstênio + diopsídio. A ocorrência comum de hornblenda nessas seções, frequentemente em texturas de reação em grãos de piroxênio (lamelas de exsolução, Fig. 5f), pode indicar retrometamorfismo ou metamorfismo na transição entre anfibolito e granulito.

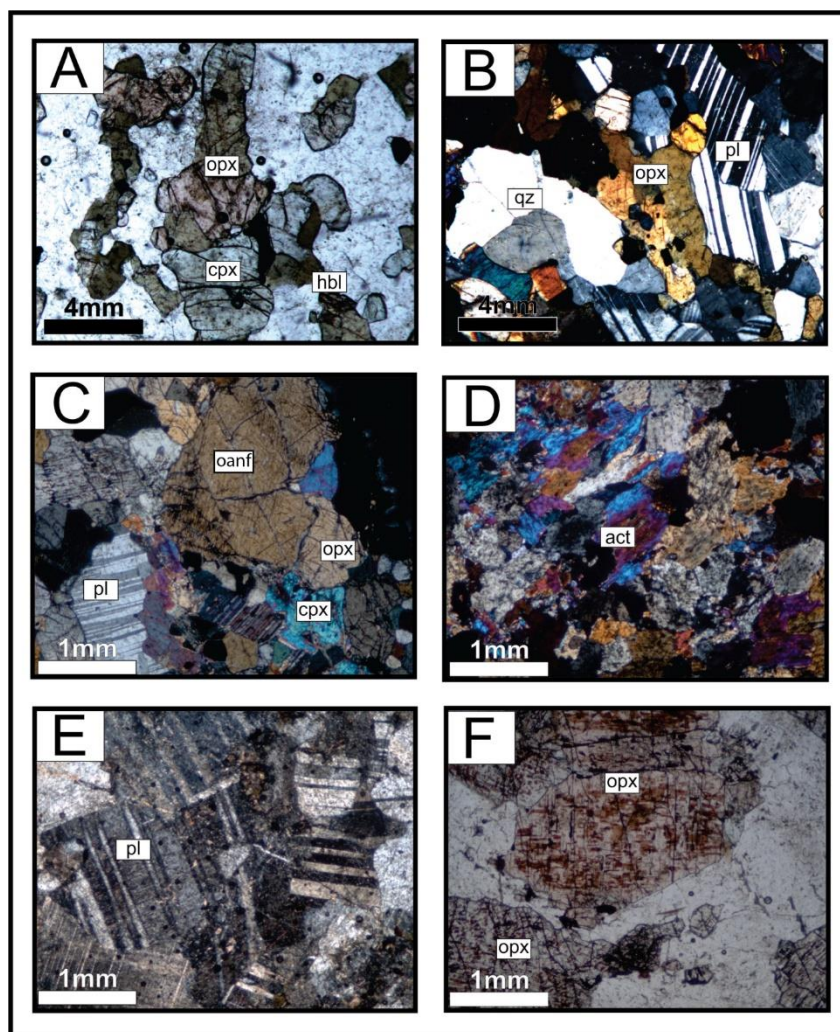


Figura 5. Fotomicrografias em luz polarizada das rochas da Associação máfica-ultramáfica. A) Mineralogia essencial dos granulitos máficos a luz natural: ortopiroxênio (opx), clinopiroxênio (cpx), hornblenda (hbl) e plagioclásio (pl); B) Mineralogia essencial dos granulitos máficos a nicóis cruzados: ortopiroxênio (opx), clinopiroxênio (cpx), hornblenda (hbl) e plagioclásio (pl); C) Mineralogia essencial de um ultramafítico: ortopiroxênio (opx), clinopiroxênio (cpx), ortoanfíbólio (oanf) e plagioclásio (pl); D) Actinolita (act) que ocorre como mineral retrometamórfico; E) Textura granoblástica e maclas em cunha, em plagioclásio, em um granulito anortosítico; F) Lamelas de exsolução em ortopiroxênio (opx).

Na Associação Tonatítica-Trondhjemítica, nos gnaisses tonalíticos e trondhjemíticos, as bandas quartzo-feldspáticas predominam em volume e as bandas máficas, compostas de hornblenda com textura nematoblástica. O mineral mais abundante é o plagioclásio, com predominante textura granoblástica. O quartzo é xenoblástico e às vezes mostra um padrão de tabuleiro de xadrez ou subgrãos (Fig. 6a, b, c). Gnaisses graníticos são compostos de K-feldspato, quartzo, plagioclásio e hornblenda. A foliação incipiente é formada pela textura nematoblástica de cristais de hornblenda. Cristais de K-feldspato são pouco presentes, em geral com textura granoblásticas (Fig. 6e, f). Os minerais acessórios são apatita, zircão e óxidos (opacos). A paragênese de fácies de anfibolito é descrita na ATT onde o maior grau metamórfico é a paragênese plagioclásio + hornblenda + clinopiroxênio, indicando possivelmente a reação progressiva do metamorfismo $\text{hbl} \rightarrow \text{cpx}$, que representa fácies superiores de anfibolitos. Para Nardi e Hartmann (1979), Hartmann (1991) e outros, a paragênese dos granulitos teria sido obliterada pelo retrometamorfismo, enquanto UFRGS (2015, 2016, 2017, 2018) argumenta que tais rochas nunca atingiram a fácies granulito.

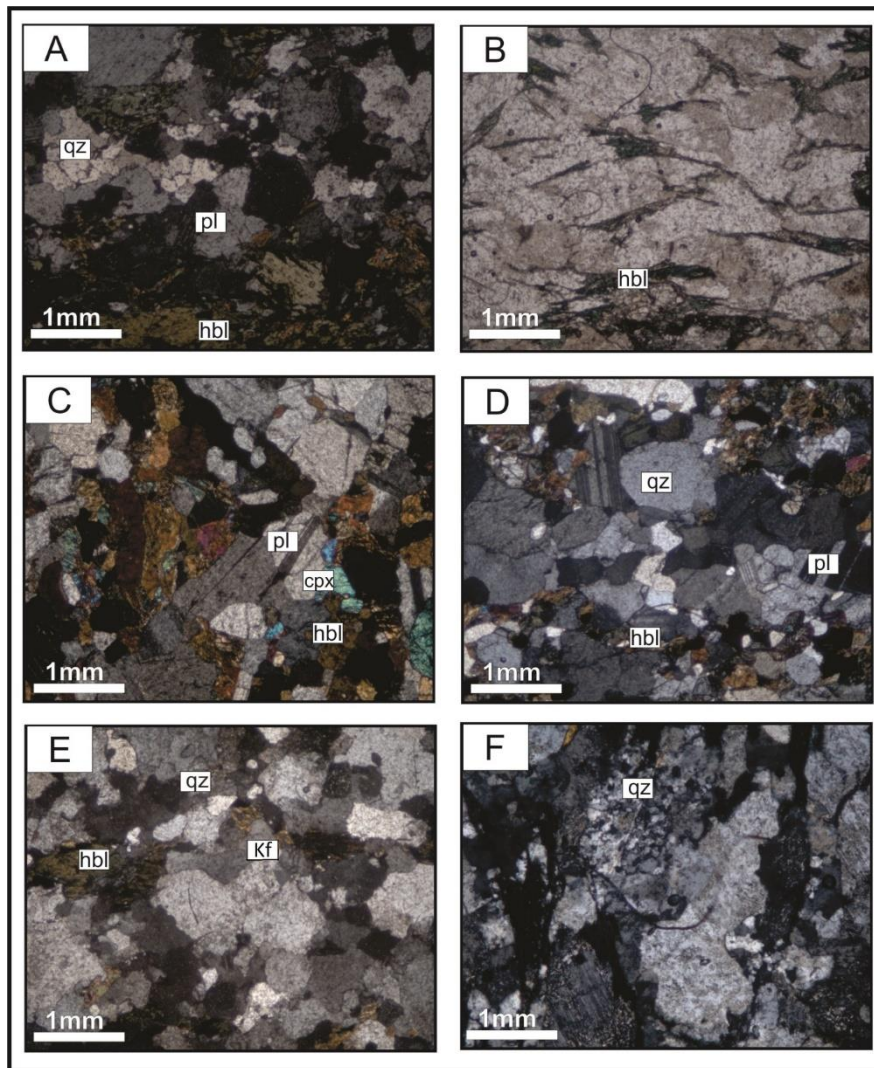


Figura 6. Fotomicrografias em luz polarizada das rochas da Associação Tonalítica-Trondhjemítica. A) Recristalização em grãos de quartzo em gnaiss tonalítico (qz); B) Textura nematoblástica marcada pela orientação dos cristais de hornblenda; C) Mineralogia essencial: plagioclásio (pl) + clinopiroxênio (cpx) + hornblenda (hbl); D) Textura granoblástica em gnaiss tonalítico entre grãos de plagioclásio (pl), quartzo (qtz) e hornblenda (hbl); E) K-feldspato com textura granoblástica em gnaiss granítico; F) Mirmequitos em gnaiss granítico.

4.1 Geoquímica e análises isotópicas Sr-Nd do Complexo Santa Maria Chico

Vinte amostras do Complexo Santa Maria Chico foram analisadas para elementos maiores, traços e razões isotópicas de Sr e Nd, sendo dez amostras da Associação Máfica-Ultramáfica, oito amostras da Associação Tonalítica-Trondhjemítica e duas da Associação Paraderivada (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de elementos maiores (%), traço (ppm) e razões isotópicas Sr-Nd das rochas do Complexo Santa Maria Chico

	AMU - metaultramafito			AMU - gnaiss gabroico-anortositico							ATT - gnaiss tonalítico-trondhjemitico					ATT - gnaiss granítico			Paragneisse	
	GR112	GR41	GR51	GR11	GR61	GR12	GR72	GR52	GR22	GR21	GR92	GR101	GR71	GR81	GR111	GR13	GR23	GR82	GR121a	GR121b
Litologia	Gn. Ultram.	Gn. Ultram.	Gn. Ultram.	Gn. Gab.	Gn. Gab.	Gn. Gab.	Gn. Gab.	Gn. An.	Gn. Gab.	Gn. An.	Gn. Tron.	Gn. Ton.	Gn. Ton.	Gn. Ton.	Gn. Ton.	Gn. Gr. M.	Gn. Gr.	Gn. Gr.	Grt. Pel.	Qz-F. Me.
SiO ₂	48,41	49,52	52,47	47,05	48,06	50,00	50,16	51,77	52,70	53,63	56,36	56,85	59,47	60,85	68,83	67,07	71,85	75,48	60,50	77,10
Al ₂ O ₃	14,46	3,80	3,17	15,82	19,88	24,78	16,96	27,47	19,50	25,73	15,18	15,88	16,06	17,24	15,36	14,30	16,35	13,64	16,18	15,46
TiO ₂	0,88	0,74	0,27	1,20	0,82	0,13	1,45	0,06	0,23	0,11	0,85	1,18	0,82	0,53	0,31	0,67	0,16	0,03	0,97	0,25
Fe ₂ O _{3(t)}	11,80	22,08	12,11	15,03	9,56	3,28	11,83	2,09	7,68	1,64	8,86	10,18	7,49	6,15	3,26	5,24	1,97	0,23	10,66	0,71
MnO	0,17	0,35	0,23	0,18	0,10	0,05	0,14	0,02	0,12	0,03	0,13	0,13	0,11	0,08	0,05	0,09	0,04	0,01	0,14	0,01
MgO	8,10	17,66	16,97	7,00	4,12	3,05	3,99	0,63	6,36	1,16	4,33	2,99	2,86	2,46	1,50	0,58	0,77	0,04	3,56	0,38
CaO	12,09	6,59	13,06	9,46	11,78	10,12	8,28	10,94	8,76	9,52	5,88	7,53	5,21	4,92	5,52	2,14	2,73	0,93	2,96	2,40
Na ₂ O	1,62	nd	0,00	1,97	2,32	2,89	3,20	3,40	3,19	3,55	2,75	2,73	3,14	4,48	2,49	1,80	3,37	1,94	1,77	2,71
K ₂ O	0,30	nd	0,13	0,23	0,74	1,18	0,69	0,46	0,41	1,21	2,83	0,35	1,48	1,63	0,21	4,93	2,73	5,85	0,80	1,49
P ₂ O ₅	0,06	0,01	0,01	0,19	0,11	0,02	0,67	0,01	0,04	0,02	0,39	0,26	0,21	0,31	0,01	0,22	0,06	nd	0,03	0,02
LOI	0,49	nd	1,43	0,33	0,64	2,78	0,90	0,86	nd	1,47	1,88	0,36	1,67	0,87	0,53	1,17	0,67	0,36	1,15	1,27
Total	98,37	100,76	99,85	98,46	98,14	98,28	98,77	98,22	98,98	98,08	99,44	98,44	98,51	99,52	98,07	98,20	100,69	98,50	98,73	101,79
Y	21	6	9	28	9	2	30	1	1	0	34	36	36	18	2	51	3	21	46	1
Pb	1	2	1	nd	0	2	nd	3	1	1	5	nd	5	6	1	24	15	34	9	22
Ni	120	163	58	96	nd	23	19	nd	77	3	20	14	19	nd	13	nd	nd	nd	63	6
Co	72	150	81	96	50	17	63	7	45	6	43	53	40	29	15	22	8	0	62	3
Cu	33	35	1	30	69	8	26	27	43	13	19	27	41	4	9	2	13	11	57	5
Ga	15	6	4	17	17	11	21	11	16	12	17	19	17	17	10	13	10	11	19	11
Sr	182	77	26	462	1106	1930	1270	648	1462	1025	612	387	797	1145	611	458	899	331	564	740
Zr	28	11	10	60	110	204	85	81	107	119	215	154	143	171	78	443	154	93	160	578
Zn	113	186	104	163	79	31	153	14	70	11	120	106	96	77	30	70	25	9	149	26
Nb	3	nd	nd	4	3	nd	7	nd	nd	nd	15	10	20	5	nd	31	1	6	8	nd
Rb	2	2	2	4	4	14	4	4	4	5	45	4	52	82	4	108	27	128	29	24
As	4	3	4	4	6	3	4	2	5	1	7	4	7	6	2	11	5	7	13	5
Cr	436	379	671	66	26	41	26	nd	258	25	95	45	45	10	68	nd	9	7	262	45
Ba	65	19	4	180	301	506	375	117	470	631	1148	139	527	707	190	2952	1634	412	622	975
Sm	-	-	2	3	3	1	-	-	-	0	7	5	8	5	-	14	1	3	5	-
Nd	-	-	13	14	19	7	-	-	-	3	46	22	49	32	-	88	5	10	36	-
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,701886	0,704470	0,707098	0,701948	0,702144	0,702239	0,702521	0,705405	0,703449	0,704561	0,712912	0,702539	0,706940	0,708994	0,702014	0,719645	0,706499	0,742700	0,708082	0,708782
SE(%)	0,0004	0,0011	0,0006	0,0021	0,0010	0,0014	0,0016	0,0048	0,0016	0,0005	0,0008	0,0004	0,0011	0,0051	0,0007	0,0006	0,0021	0,0008	0,0016	0,0011
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _(i)	0,700924	0,702207	0,700986	0,701190	0,701828	0,701585	0,702245	0,704864	0,703210	0,704168	0,706507	0,701634	0,701254	0,702703	0,701441	0,698953	0,703838	0,708815	0,703564	0,705965
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	-	-	0,102578	0,136412	0,100768	0,093993	-	-	-	0,092549	0,092689	0,132783	0,099747	0,087828	-	0,093568	0,116477	0,171919	0,083418	-
SE(%)	-	-	0,09842	0,07401	0,10019	0,10741	-	-	-	0,10908	0,10892	0,07603	0,10121	0,11495	-	0,10790	0,08667	0,05872	0,1210243	-
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	-	-	0,511514	0,511894	0,511345	0,511282	-	-	-	0,511183	0,511100	0,511865	0,511316	0,511198	-	0,511022	0,511398	0,512171	0,510922	-
SE(%)	-	-	0,0015	0,0027	0,001	0,0022	-	-	-	0,0012	0,002	0,0016	0,0008	0,0007	-	0,0014	0,0004	0,0003	0,0006	-
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd _(i)	-	-	0,510096	0,510008	0,509951	0,509982	-	-	-	0,509903	0,509818	0,510029	0,509937	0,509983	-	0,509728	0,509787	0,509793	0,509768	-
εNd	-	-	3,49	1,76	0,65	1,26	-	-	-	-0,29	-1,95	2,17	0,37	1,29	-	-3,71	-2,57	-2,44	-2,94	-
TDM	-	-	2,1	2,3	2,3	2,3	-	-	-	2,4	2,5	2,3	2,3	2,3	-	2,6	2,6	3,1	2,5	-

A AMU possui teores de SiO_2 variando de 47,05% a 53,63% e valores de Al_2O_3 entre 3,17% a 27,47%, teores de MgO , $\text{Fe}_2\text{O}_{3(t)}$ e CaO são relativamente altos, respectivamente entre 1,16% a 17,66%, 1,64% a 22,08% e 6,59% a 13,06%, em geral mais elevados nas rochas ultramáficas. A ATT mostra teores de SiO_2 variando de 56,36% a 75,48 % e valores relativamente altos de Al_2O_3 entre 13,64% a 17,24%, teores de MgO , $\text{Fe}_2\text{O}_{3(t)}$ e CaO relativamente altos, respectivamente entre 0,04% a 2,99%, 0,23% a 10,18% e 0,93% a 7,53%, em geral mais elevados nas rochas tonalíticas e mais baixos nos termos graníticos. Os paragnaisses apresentam teores de SiO_2 de 60,50% e 77,10% com teores de $\text{Fe}_2\text{O}_{3(t)}$ contrastantes, de 10,66% e 0,71%.

No diagrama de classificação para rochas plutônicas TAS (Le Bas *et al.*, 1986) o qual discrimina rochas das séries subalcalina e alcalina e utiliza como parâmetros a comparação os teores de SiO_2 vs. $\text{K}_2\text{O}+\text{NaO}$ mostra que as rochas do Complexo Santa Maria Chico possuem afinidade com as série subalcalina e/ou toleítica (Fig. 7). Quando disposto no diagrama de Miyashiro (1974) as rochas da AMU mostram uma tendência para a afinidade toleítica, enquanto que as rochas da ATT têm uma tendência a afinidade cálcico alcalina (Fig. 8). O índice de Shand em sua forma modificada por Maniar e Piccoli (1989), ilustrado na Figura 9, posiciona as rochas estudadas próximas da linha limítrofe entre os campos das rochas metaluminosas e peraluminosas com índice de saturação em alumina entre 1 e 1,2.

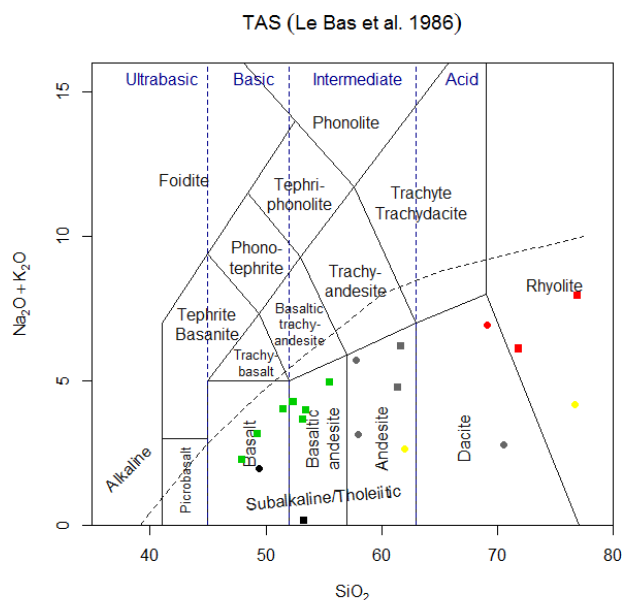


Figura 7. Diagrama TAS para a classificação das rochas do Complexo Santa Maria Chico (Le Bas *et al.*, 1986). A linha tracejada indica o limite entre os campos de rochas com afinidade geoquímica alcalina e subalcalina-toleítica. Os gnaisses calcissilicáticos foram plotados nesse diagrama apenas como referência, uma vez não se enquadram na classificação do mesmo. Legenda: Quadrado/ponto preto = Ultramafitos da Associação máfica-ultramáfica. Quadrado verde = Gnaisses anortosíticos e gabroicos da Associação máfica-ultramáfica. Quadrado/ponto cinza = gnaiss tonalítico e trondhjemítico da Associação Tonalítica-Trondhjemítica; Quadrado/ponto vermelho = gnaiss

granítico da Associação Tonalítica-Trondhjemítica. Pontos amarelos = gnaisses calcissilicáticos da Associação Paraderivada.

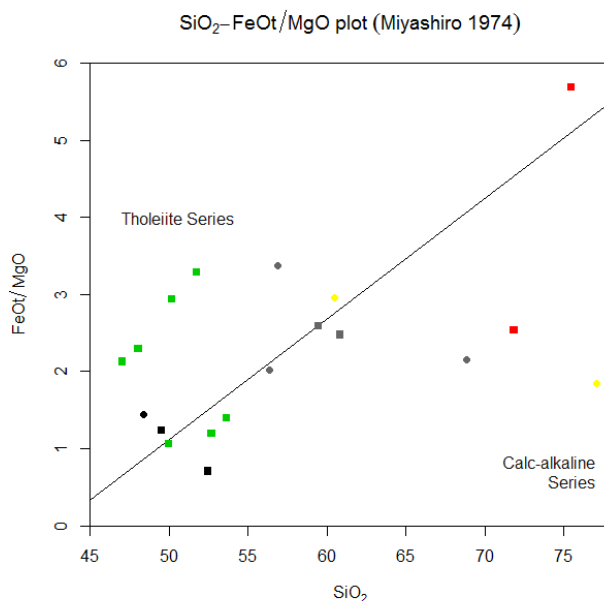


Figura 8. Diagrama SiO₂ x FeO_v/MgO para a classificação de series magmáticas (Miyashiro, 1974) das rochas do Complexo Santa Maria Chico. A linha preta contínua separa o campo das rochas da série cálcico-alcálicas das rochas da série toleítica. Os gnaisses calcissilicático foram plotados nesse diagrama apenas como referência, uma vez não se enquadram na classificação do diagrama. Legendas como na Figura 7.

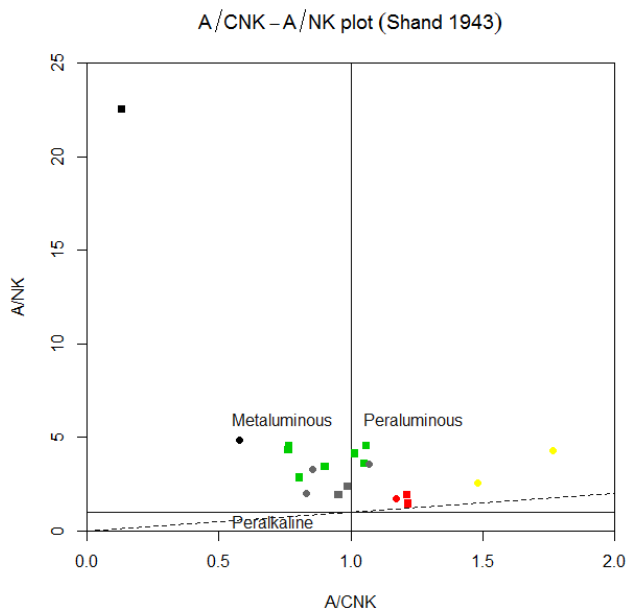


Figura 9. Diagrama A/CNK vs. A/NK (Shand, 1943 modificado por Maniar e Piccoli, 1989) para as rochas das rochas do Complexo Santa Maria Chico com a individualização dos campos das rochas peralcalinas, metaluminosas e peraluminosas. Os gnaisses calcissilicáticos foram plotados nesse diagrama apenas como referência, uma vez não se enquadram na classificação do diagrama. Legendas como na Figura 7.

Os diagramas do tipo *Harker* (Fig. 10) para os elementos maiores exibem tendências de variação coerentes com correlações lineares negativas entre SiO_2 e os elementos Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3(t)}$, TiO_2 , MgO , CaO e P_2O_5 . Na_2O não apresenta variação significativa com a sílica, enquanto os valores de K_2O são sempre elevados com certa correlação positiva (Fig. 10). Cabe aqui destacar que em alguns diagramas, como SiO_2 x MgO , SiO_2 x P_2O_3 e SiO_2 x $\text{FeO}_{(t)}$ é possível individualizar dois *trends* distintos, um para as rochas da AMU e outro para a ATT. O comportamento de elementos traço como o Rb, Ba, Sr, Zr e Cr em relação a SiO_2 apresenta uma correlação negativa com o aumento do teor de SiO_2 , ao contrário de Rb e Ba, que revelam uma correlação positiva com a elevação dos teores de sílica.

Para comparação das rochas analisadas em relação à distribuição dos elementos menores e traços nos diagramas multielementares (*spider plot*, Fig. 11), as amostras foram normalizadas aos valores do manto primitivo de Sun e McDonough (1989) e mostram concentrações dos elementos litófilos de grande raio iônico (LILE) com enriquecimento de Rb e K, com padrões mais enriquecidos para as rochas da ATT, em especial aos termos graníticos, e mais empobrecidos em relação a estes na AMU, onde os termos ultramáficos são as rocha que mais se aproximam do manto primitivo. Nos elementos de alto potencial iônico (HFSE), observa-se um padrão disperso, em pouco geral enriquecido em relação ao manto primitivo para as duas associações, com anomalia negativa principalmente de P em todas associações e uma leve depleção em relação ao manto primitivo das rochas da AMU.

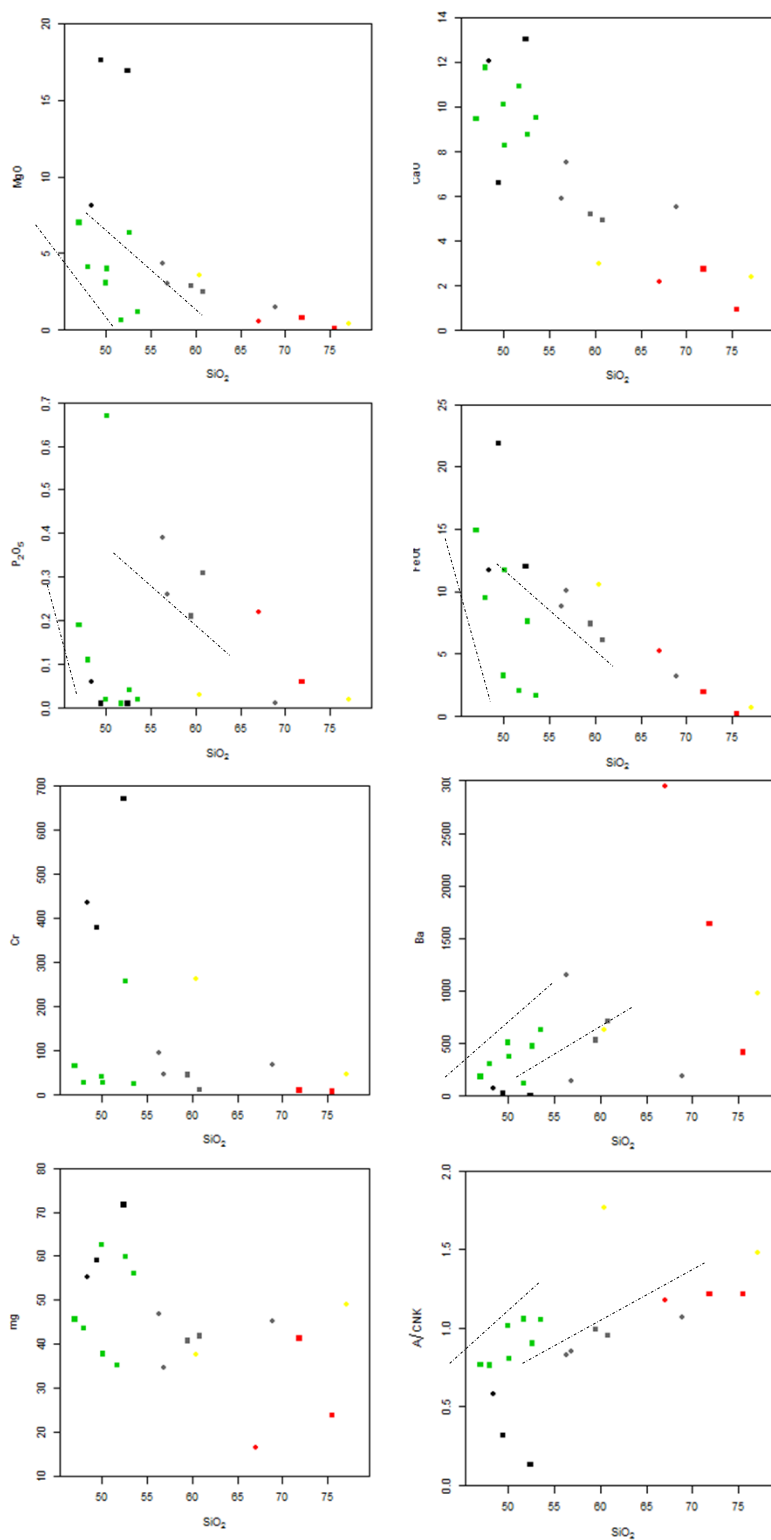


Figura 10. Diagramas Harker para elementos maiores e traços do Complexo Santa Maria Chico. Linhas tracejadas definem *trends* distintos para as rochas da AMU e da ATT. Legendas como na Figura 7.

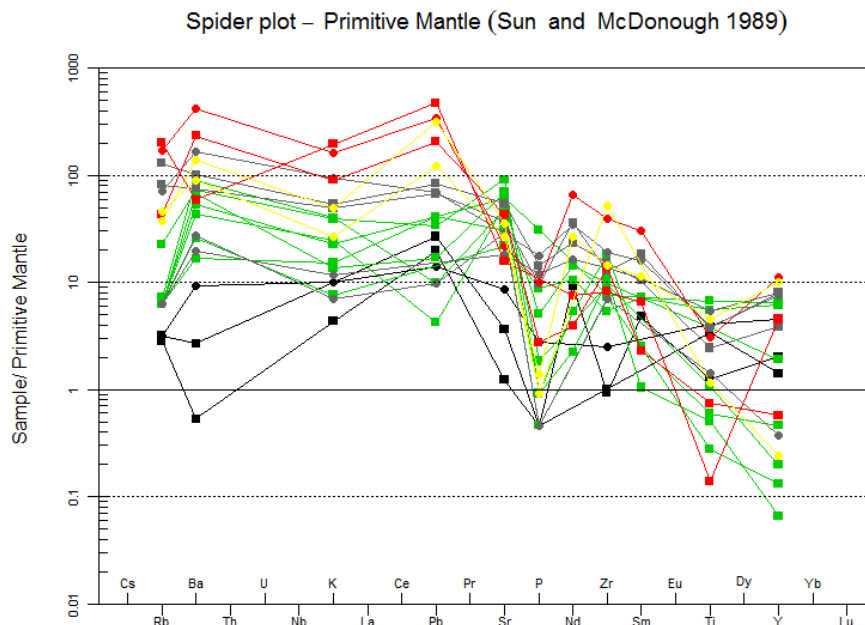


Figura 11. Diagramas multielementares normalizados para o manto primitivo (Sun e McDonough, 1989) para as rochas do Complexo Santa Maria Chico. Legendas como na Figura 7.

Os valores isotópicos da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ foram reduzidos para o tempo da idade de 2.1 Ga em função dessa ser a idade mais jovem para as rochas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico de Girelli *et al.* (2018). Assim, as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ variaram de 0,700924 a 0,704864 para as rochas da AMU, enquanto que para as rochas da ATT as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ variaram de 0,701254 a 0,708815. O valor 0,698953 foi obtido para uma amostra de gnaiss granítico (GR-13), valor esse abaixo dos valores para a curva de evolução do Sr para o planeta Terra (Faure e Mesing, 2005). Os paragneisses apresentam razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ de 0,703564 e 0,705965.

Os valores isotópicos da razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ no tempo da idade de 2,1 Ga Ma variaram de 0,509903 a 0,510096 para as rochas da AMU, enquanto que para as rochas da ATT as razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ variaram de 0,511022 a 0,512171. Para o paragneiss analisado, a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ obtida foi de 0,510922.

Os valores de $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ variam de -0,29 a 3,49 para as rochas da AMU, enquanto que para as rochas da ATT os valores de $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ variam de -3,71 a 2,17 e para o paragneiss o valor de $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ é de -2,94. A idade modelo Sm-Nd, T_{DM} , oscilou entre 2,1 a 2,4 Ga para as rochas da AMU, enquanto que para as rochas da ATT os valores de T_{DM} varia de 2,3 a 3,1 e para o paragneiss a idade T_{DM} é de 2,5 Ga.

5. Discussões

A partir de critérios de campo, petrográficos e geoquímicos obtidos por UFRGS (2015), CPRM (2017) e Girelli *et al.* (2018) as rochas do Complexo Santa Maria Chico podem ser individualizadas em três subunidades: AMU (associação máfica-ultramáfica); ATT (associação tonalítica-trondhjemítica), AP (Associação Paraderivada)

Sob ponto de vista geocronológico a idade paleoproterozoica para o complexo é um consenso, tendo como base as relações relativas e absolutas que indicam que a AMU é a mais antiga das três subunidades, com idade de cristalização de 2.413 ± 13 (U-Pb em zircão LA-ICP-MS, Girelli *et al.*, 2008) para metagabros (AMU), enquanto que a idade de 2.173 ± 20 Ma (U-Pb em zircão LA-ICP-MS) para metatonalitos (ATT?) do complexo. Por sua vez, a idade de 2.331 ± 31 Ma (U-Pb em zircão LA-ICP-MS) é sugerida por CPRM (2017) como a idade de máxima deposição sugerindo assim que as rochas da ATT não participaram com fonte dessa bacia sedimentar. O metamorfismo de fácies granulítico dessas rochas é estimado por Girelli *et al.* (2018) como tendo uma idade de 2.060 Ma (U-Pb em zircão LA-ICP-MS), estimado a partir de análises em bordas de cristais de zircão de rochas da unidade básica-ultrabásica (BUU ou a AMU). Diques graníticos relacionados a extensão crustal ocorrem com idades de 1,8 Ga, cortam as rochas do complexo (U-Pb em zircão LA-ICP-MS em gnaisses graníticos, Girelli *et al.*, 2018).

Sob ponto de vista geoquímico, as amostras analisadas mostram valores coerentes com os observados por CPRM (2017) e Girelli *et al.* (2018) para os elementos maiores e traços, inclusive esses dois últimos trabalhos com uma gama maior de elementos traços, permitindo maiores considerações, por exemplo, quanto ao posicionamento geotectônico do complexo (e.g. diagramas ternários Ta x Nb x Hf) que sugerem que as rochas ortoderivadas do Complexo foram geradas em um ambiente de arco de ilhas e/ou arco continental (Girelli *et al.*, 2018). Porém, as rochas ortoderivadas da AMU e ATT apresentam características geoquímicas distintas, como por exemplo de afinidade geoquímica, toleítica para a AMU e cálcico-alcalina para a ATT (Fig. 8), padrões estes já identificadas por CPRM (2017) e Girelli *et al.* (2018). Ainda, em diagramas Harker (Fig. 10) as rochas da AMU e da ATT dispõem-se em *trends* diferentes para alguns elementos, entre eles o MgO e o P₂O₃, sugerindo a presença de processos magmáticos distintos em sua geração. A remobilização de elementos durante o evento metamórfico pode ser uma potencial fonte para a geração desses padrões distintos, porém os mesmos padrões similares são observados em *spider plots* de elementos LILE e HFSE (Fig.

11). Ainda, essa remobilização de elementos por processos posteriores ao do magmatismo (e.g. metamorfismo e/ou alteração intempérica) parece não ter modificado de forma intensa os dados geoquímicos, conforme pode ser também observado em elementos considerados móveis como o Sr, onde os valores isotópicos são similares e condizentes com protólitos de derivação mantélica, ou seja, mantendo as assinaturas químicas dos protólitos (conforme discutido abaixo), mesmo com metamorfismo de alto grau atuando sobre essas rochas.

No complexo, os estudos isotópicos têm sido direcionados para geocronologia. Para estudos petrológicos, os dados são escassos. Soliani Jr. (1986) mostra razões iniciais de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em torno de 0,7019 a 0,7021, sugerindo uma contribuição mantélica como a principal fonte dos protólitos do complexo. Os dados Sm-Nd de Hartmann (1987) sugerem valores ϵNd positivos, com a razão inicial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ próxima de 0,510 para uma idade de 2,1 Ga. Já Girelli *et al.* (2016, 2018), com base em dados Lu-Hf apresenta valores de $\epsilon\text{Hf}(t)$ $-3,17$ a $+7,00$ para as rochas relacionadas a unidade básica-ultrabásica, o magmatismo de arco de ilha, e $\epsilon\text{Hf}(t)$ -4 a $+2,4$ para as rochas relacionadas a unidade ácida-intermediária interpretadas como de acreção tardia do arco. Esses dados associados a idades de cristalização próximas às idades modelos de háfnio (T_{DM}) de 2,7 Ga, que indicam uma fonte juvenil para os protólitos do magmatismo do complexo.

Com relação a processos magmáticos e fontes, o magmatismo (protólitos) das rochas ortoderivadas do Complexo Santa Maria Chico, o processo de cristalização fracionada com subordinada assimilação de crosta deve ter sido importante na geração das rochas do complexo. No diagrama SiO_2 vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Fig. 12) a presença de componentes crustais pode ser verificada na AMU, pois os padrões observados indicam um aumento da razão isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em relação a SiO_2 , interpretados como a presença de material isotopicamente distinto em um fonte que tem como processo de diferenciação a cristalização fracionada. Porém, em relação as rochas da ATT, o padrão não é o mesmo, o *trend* não tem uma tendência positiva acentuada, mas sim uma tendência mais horizontal no diagrama ou um *trend* menos positivo quando comparado a AMU, sugerindo que o processo de cristalização foi, no mínimo, predominante em relação a assimilação crustal. Observa-se ainda que o componente crustal dessa contaminação pode ser uma rocha similar isotopicamente com as rochas paraderivadas da região, tanto para a AMU quanto para a ATT, porém, para a AMU os dados geocronológicos não suportam tal premissa, pois tem idades de cristalização mais novas do que a idade máxima de sedimentação. Assim, para as rochas dessas duas associações, o processo evolutivo de cristalização fracionada mais assimilação das rochas encaixantes pode ser o processo magmático envolvido em sua geração, uma vez que com a diferenciação, ocorre a modificação da composição isotópica desses

magmas em função da assimilação de materiais com composições isotópicas distintas (ver Faure e Mensing, 2005; Rollinson, 2014).

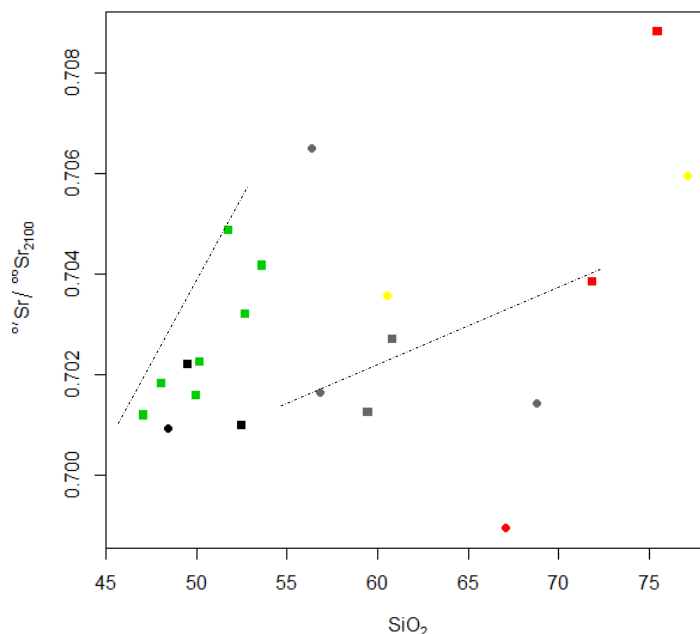


Figura 12. Diagrama de razão isotópica vs. elemental ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ x SiO_2) para as rochas do Complexo Santa Maria Chico. Legendas como na Figura 7.

A participação de material mantélico nas rochas do Complexo Santa Maria Chico pode ser evidenciada pelos diagramas de idade vs. ϵNd conforme a Figura 13 (elaborada com base em Janousek *et al.*, 2016), através dos altos valores positivos de $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$, além de baixos valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ da ordem de 0,702 (conforme Tabela 1).

Os valores de $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ para todas as rochas da AMU e da ATT são em geral positivos para a maioria das rochas da AMU, e a maioria das rochas da ATT, com exceção dos gnaisses graníticos que apresentam valores pouco negativos de $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$. Observa-se ainda (Fig. 13) que os T_{DM} das rochas variando entre 2,1 a 2,6 Ga são similares às idades de cristalização para as rochas ortoderivadas (2,4 a 2,1 Ga) propostas por Girelli *et al.* (2018). A exceção é um gnaisse granítico (GR-82, Tabela 1) com T_{DM} de 3,1 Ga, que em função de sua milonitização pode ter tido sua composição isotópica de Nd alterada, assim como uma amostra desse gnaisse também apresenta valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ abaixo da curva de evolução da Terra (GR-13, Tabela 1).

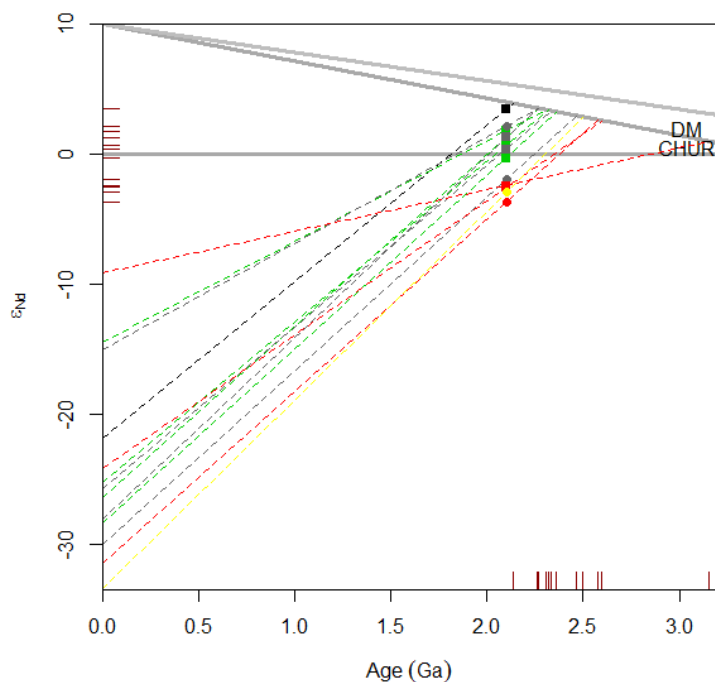


Figura 13. Diagrama de $\epsilon_{Nd(2,1Ga)}$ vs. idade (*age*) para as rochas do Complexo Santa Maria Chico (modificado de De Paolo, 1981). DM = *Depleted mantle*, CHUR = *chondritic uniform reservoir*. Legendas como na Figura 7.

A fonte do magmatismo do Complexo Santa Maria Chico pode ser discutida em termos de participação de um componente mantélico, mais um componente crustal. Assim, no diagrama Sr-Nd calculado a 2,1 Ga Ma apresentado na Figura 14 (elaborada a partir de Janousek *et al.*, 2016), pode-se observar o comportamento das rochas da AMU e da ATT em relação a alguns reservatórios mantélicos e crustal, este último representado pelo paragnaisse analisado nesse trabalho, com intuito de sugerir potenciais fontes desse magmatismo.

Ressalta-se que os membros finais mantélicos usados (PM, DM, EMI, EMII, HIMU, Zindler e Hart, 1986; Rollinson, 2014) servem apenas como uma comparação de similares-análogos modernos, uma vez que durante o arqueano e o paleoproterozoico o manto pode não refletir a composição desses reservatórios atuais (Blichert-Toft *et al.*, 2010). Os *end-members* mantélicos comparados são o manto primitivo (PM), o manto depletado (DM) e os mantos enriquecidos (EM-I e EM-II) e mantos enriquecidos em U e Pb devido a reciclagem de crosta oceânica basáltica (High- μ) conforme discutidos em Faure e Mensing (2005), Gil, (2010), entre outros.

O componente crustal aprestado nesse diagrama da Figura 14 é o paragnaisse (GR-121a, Tabela 1) que apresenta baixo valor de Sr radiogênico e alto valor de Nd radiogênico.

As rochas da AMU mostram menor variação nas razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e variação no Nd radiogênico em relação as rochas da ATT, dispondo-se predominantemente no campo das rochas mantélicas, porém com dispersão de uma amostra para o campo das rochas crustais (GR-21, gnaiss anortosítico). Destaca-se que a amostra de gnaiss ultramáfica (GR-51) é a que pode ser considerada a menos evoluída da AMU, com valores de $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$, de 3,49 e baixos valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})} = 0,700986$.

As rochas da ATT mostram maior variação nas razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e no Nd radiogênico em relação às rochas da AMU, dispondo-se predominantemente no campo das rochas mantélicas, também apresentando uma amostra dispersando para o campo das rochas crustais (GR-92, gnaiss trondhjémítico). Destaca-se que as amostras DM a ATT tem um comportamento similar a da AMU, e que os gnaisses graníticos dispersam dessa tendência, com os valores de $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$, mais negativos de todos e razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ muito dispersas.

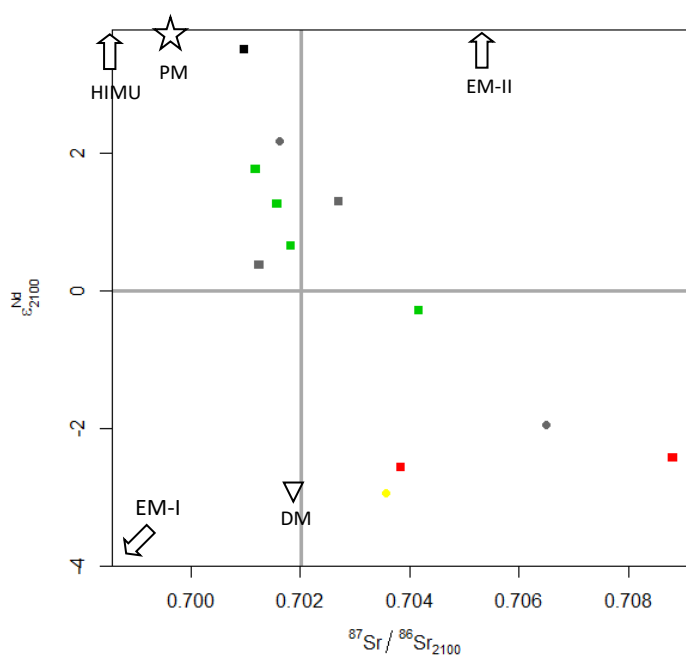


Figura 14. Diagrama $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ para as rochas do Complexo Santa Maria Chico (modificado de DePaolo e Wasserburg, 1979). Membros finais do manto (calculado para 2,1 Ga, extraídos de Zindler e Hart, 1986; Rollinson, 2014): PM (manto primitivo); DM (manto depletado); HIMU (manto com elevada razão U-Pb); EM-I (manto enriquecido I); EM-II (manto enriquecido II); HIMU (manto enriquecido em U e Pb). As razões dos *end-member* HIMU, EM-I e EM-II dispõem-se fora do diagrama apresentado na figura. Legendas como na Figura 7.

Assim, o cenário mais adequado para a geração das rochas do Complexo Santa Maria Chico, tanto para a AMU quanto para a ATT é a fusão de um membro mantélico, potencialmente similar aos *end-members* HIMU, PREMA ou DM, com participação de uma crosta da região, potencialmente com composição isotópica similar aos paragneisses do

complexo. Conforme observado na Figura 14, quando os *end-members* do manto atual são comparados dispostos no diagrama, o HIMU, o EM-I e o EM-II dispõem-se fora do diagrama, ou seja, com características isotópicas distintas das amostras do complexo, assim como o DM que, apesar de plotar no próximas as amostras do complexo no diagrama $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$ (Fig. 14) apresenta composições estimadas mais enriquecida em Sr e Nd do que as amostras do complexo. Porém, quando o *end-member* PM é comparado no diagrama $\epsilon\text{Nd}_{(2,1\text{Ga})}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(2,1\text{Ga})}$, o mesmo dispõe-se em uma posição pouco menos radiogênica que as rochas da AMU e da ATT, sendo potencialmente o reservatório mantélico precursor das rochas do Complexo Santa Maria Chico.

A participação de *end-member* mantélicos do tipo EM-I e EM-II pode ser descartada, uma vez que os *trends* apresentados pela AMU e ATT não se posicionam próximos desses *end-members*, ou seja, os dois *end-member* enriquecidos não sugerem que tenham sido o manto predominante na geração das rochas do Complexo Santa Maria Chico. Uma fonte mantélica do tipo HIMU (High- μ) somente poderá ser descartada com análises isotópicas de Pb, uma vez que elas é que sugerem uma assinatura de rochas geradas a partir de placa oceânica reciclada ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 21,5$, Weiss *et al.*, 2016). A tectônica de placas durante o Paleoproterozoico foi um período de ampla formação de crosta continental e oceânica, mas a presença do manto primitivo ainda era mais dominante em relação ao manto depletado (Faure e Mensing, 2005; Rollinson, 2014). Este argumento, em conjunto com diagramas *spider plots* normalizados para o manto primitivo (Fig. 11), onde os padrões horizontalizados e pouco enriquecidos das rochas do Complexo Santa Maria Chico, sugerem que o manto primitivo foi a fonte do magma mantélico que gerou a AMU e a ATT.

Assim, a integração das discussões apresentadas a partir das informações geoquímicas e de isótopos de Sr-Nd para as rochas do Complexo Santa Maria Chico sugere a presença de duas subunidades, que, apesar de apresentarem fontes similares, ou seja, predomínio de magmas de derivação mantélica, tipo PM (*primitive mantle*, Fig. 14) com pouca participação crustal (similar isotopicamente a subunidade dos paragnais), houve porém maior participação de crosta nas rochas da AMU e o predomínio da cristalização fracionada nas rochas da ATT (Fig. 12). Em conjunto com afinidades químicas distintas, pois apresentam *trends* distintos em diagramas de elementos maiores (Fig. 10), e idades que podem ter variado para as associações em mais de 200 Ma (2,4 a 2,1 Ga, Girelli *et al.*, 2018, respectivamente para a AMU e ATT) associados às evidências de campo, como menor grau de deformação na AMU em relação a ATT, às evidências de metamorfismo onde as rochas da AMU apresentam-se na fácies granulito, retrometamorfizadas para fácies anfíbolito-xisto verde, enquanto que as rochas da

ATT apenas apresentam metamorfismo de fácies anfíbolito (UFRGS, 2015), indicam que as rochas do Complexo Santa Maria Chico, subunidade AMU e subunidade ATT não tem uma evolução do protólito em comum, ou seja, apresentam histórias magmático-metamórficas-deformacionais distintas, vinculadas, respectivamente a um ambiente de arco de ilha que evoluiu para um arco continental, ampliando assim as discussões e o cenário do Cráton Ríó de la Plata durante o paleoproterozoico no Escudo Sul-rio-grandense.

6. Conclusões

As rochas do Complexo Santa Maria Chico, pertencentes ao Cráton Ríó de la Plata no sudoeste do Escudo Sul-rio-grandense apresentam três subunidades, i) AMU, ii) ATT e iii) AP, sendo as duas primeiras de origem magmática e a última de origem sedimentar. As rochas ortoderivadas da AMU são formadas predominantemente por metaultramafitos e gnaisses gabroicos metamorfizados em fácies granulito e retrometamorfizados em fácies anfíbolito-xisto verde, com dois piroxênios como assembleia mineral diagnóstica, têm afinidade química de rochas toleíticas, geradas por um processo de cristalização fracionada a partir de uma magma de derivação mantélica similar ao manto primitivo, com assimilação de material crustal similar às rochas da associação paraderivada.

As rochas ortoderivadas da ATT são formadas predominantemente por gnaisses tonalíticos e trondjemíticos, subordinadamente por gnaisses graníticos, metamorfizadas em fácies anfíbolito e retrometamorfizadas em fácies xistos verdes, com anfíbólio +plagioclásio como assembleia mineral diagnóstica, têm afinidade química de rochas cálcico-alcalinas, geradas por um processo de cristalização fracionada a partir de uma magma de derivação mantélica similar ao manto primitivo, com assimilação de pouco material crustal similar a rochas da associação paraderivada.

As informações obtidas sugerem que os protólitos das subunidades AMU e ATT na região do Cráton Ríó de la Plata tenham se formado em ambientes de arco de ilhas que evoluíram para arco continental, em diferentes tempos, sob condições diferentes de metamorfismo, gerando duas associações de rochas com similaridades, mas que a partir da integração de dados geoquímicos e isotópicos com os disponíveis na literatura permitem ampliar as discussões sobre a evolução do Cráton Ríó de la Plata no Escudo Sul-rio-grandense.

Agradecimentos

Os autores agradecem: os revisores anônimos por seus comentários e sugestões sobre o manuscrito e a editor da revista. Este trabalho foi financiado por projetos de pesquisas FAPERGS, CNPq e teve o suporte de análises geoquímicas do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq) do Instituto de Geociências (IGeo) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo.

Referências

- Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S. (2000). Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(1), 186-189.
- Blichert-Toft, J., Puchtel, I.S. (2010). Depleted mantle sources through time: evidence from Lu–Hf and Sm–Nd isotope systematics of Archean komatiites. *Earth and Planetary Science Letters* 297 (3-4), 598-606
- Costa, A.F.U. (1997). Teste e modelagem geofísica da estruturação das associações litotectônicas pré-cambrianas no Escudo Sul-rio-grandense. Porto Alegre, 291f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CPRM. (2012). Carta Geológica da Folha Hulha Negra SH.22-Y-C-I, Escala 1:100.000. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil.
- CPRM. (2014a). Carta Geológica da Folha Bagé SH.21-Z-D-III, escala 1:100.000. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil.
- CPRM. (2014b). Carta Geológica da Folha Igrejinha SH.21-Z-D-II, escala 1:100.000. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil.
- CPRM. (2017). Carta Geológica da Folha Lagoa da Meia Lua SH.21-Z-B-VI, Escala 1:100.000. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil.
- CPRM. (2019). Levantamento Geológico e do Potencial Mineral de Novas Fronteiras: Projeto Sudeste do Rio Grande do Sul: escalas 1:250.000 e 1:100.00, Estado do Rio Grande do Sul. Serviço Geológico do Brasil.
- De Paolo, D.J., 1981. A neodymium and strontium isotopic study of the mesozoic calc-alkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. *Journal of Geophysical Research*, 86, 10470-10488.
- De Paolo, D.J.; Wasserburg, G.J. (1979) Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43 (4). pp. 615-627.
- Faure, G., Mensing, T. M. (2005). *Isotopes: Principles and applications* (3rd ed.). Nova Jersey: John Wiley & Sons.
- Favetto, A., Rocha, V., Pomposiello, C., Garcia, R., Barcelona, H. (2015). A new limit for the NW Río de la Plata Craton Border at about 24°S (Argentina) detected by Magnetotellurics. *Geologica Acta* 13(3), 249
- Fernandes, L.A.D., Menegat, R., Costa, A.F.U., Koester, E., Porcher, C.C., Tommasi, A., Camozzato, E. (1995). Evolução Tectônica Do Cinturão Dom Feliciano No Escudo Sul-Rio-Grandense: Parte L - Uma Contribuição A Partir Do Registro Geológico. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4), 351–374.
- Formoso, M.L.L., Hartmann, L.A., Nardi, L.V.S. (1980). A razão K/Rb Em Anortositos e Rochas Granulíticas do Escudo Sulriograndense - Metassomatismo e Consequências

- Geocronológicas. In XXXI Congresso Brasileiro de Geologia (pp. 119–127). Balneário Camboriú.
- Fragoso Cesar, A.R., Soliani Jr., E. (1984). Compartimentação Tectônica do Cráton do Rio de La Plata. In XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia (pp. 2426–2434). Rio de Janeiro.
- Gaucher, C., Frei, R., Chemale, F., Frei, D., Bossi, J., Martínez, G., Chiglino, L., Cernuschi, F., (2011). Mesoproterozoic evolution of the Rio de la Plata Craton in Uruguay: at the heart of Rodinia? *International Journal of Earth Sciences*, 100, 273–288
- Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Girelli, T.J., Chemale Jr., F., Lavina, E.L.C., Lana, C. de C., Laux, J.H. (2016). Novos dados de Geocronologia U-Pb e Lu-Hf para o Complexo Granulítico Santa Maria Chico - RS. In 48o Congresso Brasileiro de Geologia. Porto Alegre.
- Girelli, T.J., Chemale, F., Lavina, E.L.C., Laux, J.H., Bongiollo, E.M., Lana, C. (2018). Granulite accretion to Rio de la Plata Craton, based on zircon U-Pb-Hf isotopes: Tectonic implications for Columbia Supercontinent reconstruction. *Gondwana Research*, 56, 105–118.
- Gregory, T.R., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Florisbal, L.M., Chemale Jr., F. (2015). Geochronological data from TTG-type rock associations of the Arroio dos Ratos Complex and implications for crustal evolution of southernmost Brazil in Paleoproterozoic times. *Journal of South American Earth Sciences*, 57:49-60
- Hartmann, L.A., Nardi, L.V.S. (1980). O Cinturão Granulítico Atlântico nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. *Acta Geologica Leopoldensia*, 4(12), 3–12.
- Hartmann, L.A. (1987). Isócrona Sm-Nd de 2,1Ga em Minerais de Duas Amostras do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS. In I Congresso Brasileiro de Geoquímica (pp. 105–111). Porto Alegre.
- Hartmann, L.A. (1988). Geoquímica De Terras Raras E Geotermobarometria De Granulitos De Dom Pedrito E Luis Alves, No Extremo Sul Do Brasil. *Geochimica Brasiliensis*, 2(1), 1–14.
- Hartmann, L.A. (1991). Condições De Metamorfismo No Complexo Granulítico Santa Maria Chico, Rs. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(2), 107–113.
- Hartmann, L.A. (1998). Deepest exposed crust of Brazil - Geochemistry of paleoproterozoic depleted Santa Maria Chico granulites. *Gondwana Research*, 1(3–4), 331–341.
- Hartmann, L.A., Leite, J.A.D., McNaughton, N.J., Santos, J.O.S. (1999). Deepest exposed crust of Brazil-SHRIMP establishes three events. *Geology*, 27(10), 947–950.
- Hartmann, L.A., Leite, J.A.D., da Silva, L.C., Remus, M.V.D., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Vasconcellos, M.A.Z. (2000a). Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47, 829–844.
- Hartmann, L. A., Porcher. C C., Remus, M. V. D. (2000b). Evolução das Rochas Metamórficas do Rio Grande do Sul. In M. Holz e L. F. de Ros (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul* (pp. 79–118). Porto Alegre: CIGO/UFRGS.
- Hartmann, L.A., Liu, D., Wang, Y., Massonne, H.J., Santos, J.O.S. (2008). Protolith age of Santa Maria Chico granulites dated on zircons from an associated amphibolite-facies granodiorite in southernmost Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 80(3), 543–551.
- 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. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 80(1).
- Janousek, V., Farrow, C.M., Erban, V. (2006). Interpretation of Whole-rock Geochemical Data in Igneous Geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47(6), 1255–1259.

- Koester, E., Soliani Jr, E., Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., Fernandes, L.A.D., McNaughton, N.J., Santos, J.O.S., Oliveira, L.D. (2001). SHRIMP U-Pb age for the emplacement of the Santana Granite and reactivation of the Porto Alegre Suture, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 14, 91-99.
- Kraemer, G. (1995). *Evolução magmática e tectônica da Suíte Ortometamórfica Imbicuí, região de Lavras do Sul (RS)*. Porto Alegre. 99p. (Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul)
- Laux, J.H., Bongioiolo, E.M., Chemale Jr., F., Gross, A.O.M.daS., Santos, T.C. dos. (2010). Reavaliação da idade do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS. In 45º Congresso Brasileiro de Geologia (p. 55). Belém.
- Laux, J.H., Bongioiolo, E.M. (2011). Geoquímica do Complexo Granulítico Santa Maria Chico : Arco de Ilha Proterozóico no Rio Grande do Sul. In XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica (pp. 744–747). Gramado.
- Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J., Chemale Jr., F., (1998). SHRIMP U/Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost Brazil. *International Geology. Review*. 40, 688–705.
- Lenz, C., Porcher, C.C., Fernandes, L.A.D., Masquelin, H., Koester, E., Conceição, R.V. (2012). Geochemistry of the Neoproterozoic (800 - 767 Ma) Cerro Bori orthogneisses, Dom Feliciano belt in Uruguay: tectonic evolution of an ancient continental arc. *Mineral. Petrol.* 1, 10.
- Le Bas, M.J., Maitre, R.W.L., Streckeisen, A., Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745–750.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M. (1989). Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 635-643.
- Miyashiro, A. (1974). Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*.
- Nardi, L. V. S., Hartmann, L. A. (1979). O Complexo granulítico Santa Maria Chico do Escudo Sulriograndense. *Acta Geologica Leopoldensia*. 3(6):45-75.
- Nardi, L. V. S., Hartmann, L. A. (1980). Estudo Geoquímico de Rochas Granulíticas do Oeste do Escudo Sulriograndense. *Acta Geologica Leopoldensia*, 4(11), 3–18.
- Oyhantçabal, P., Siegesmund, S., Wemmer, K., (2011). The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature. *International Journal of Earth Sciences* 100, 201–220.
- Padilha, D.F, Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Florisbal, L., Reis, C., Geraldés, M., Almeida, B.S. (2019). Sources and settings of Ediacaran post-collisional syenite-monzonite-diorite shoshonitic magmatism from southernmost Brazil. *Lithos*, (344–345), 482-503
- Paim, P.S.G., Chemale Jr., F., Lopes, C. (2000). A Bacia do Camaquã. In M. Holz e L. F. de Ros (Eds.), *Geologia do Rio Grande do Sul* (pp. 231–274). Porto Alegre: CIGO/UFRGS.
- Peel, E., Sánchez-Bettucci, L., 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). *J. South Am. Earth Sci.* 85, 250–262.
- Philipp, R.P., (1998). *A evolução geológica e tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, pp. 255p.
- Philipp, R.P., Campos, R.S., (2004). Geologia, petrográfica e litogeoquímica dos Gnaisses Porto Alegre, RS, Brasil: implicações geotectônicas. *Pesquisas. em Geociências* 31 (2), 79–94.

- Philipp, R.P., Girelli, T., Lopes, R. C., Sander, A., Lavina, E. L. C. (2015). Petrografia e Litogeoquímica Do Complexo Granulítico Santa Maria Chico Na Região De Fontouras, Dom Pedrito/RS. In IX Simpósio Sul-Brasileiro De Geologia. Florianópolis.
- Porcher, C.C., McNaughton, N.J., Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., Fernandes, L.A.D., 1999. Idade SHRIMP em zircão: vulcanismo ácido do Complexo Metamórfico Porongos. In: I Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, Gramado. Abstracts, pp. 110.
- Ramos, R.C., Koester, E. (2014). Geologia da associação metamáfica-ultramáfica da região de Arroio Grande, sudeste do Escudo Sul-Rio-Grandense. *Pesquisas em Geociências*, 41, 25-38.
- Ramos, R.C., Koester, E., Vieira, D.T., Porcher, C.C., Gezatt, J.N., Silveira, R.L. (2018). Insights on the evolution of the Arroio grande ophiolite (Dom Feliciano belt, Brazil) from Rb-Sr and SHRIMP U-Pb isotopic geochemistry. *J. South Am. Earth Sci.* 86, 38–53.
- Rapela, C.W., Fanning, C.M., Casquet, C., Pankhurst, R.J., Spalletti, L., Poiré, D., Baldo, E.G., (2011). The Rio de la Plata craton and the adjoining Pan-African/brasiliano terranes: their origins and incorporation into south-west Gondwana. *Gondwana Research* 20:673–690.
- Rass, I.T., Aranovich, L.Y., Korpechkov, D.I., Kozlovskii, V.M. (2014). Geochemistry of metamorphic processes in mafic rocks of the Krasnaya Guba area, Belomorian Mobile Belt. *Geochemistry International*, 52(8), 670–686.
- Remus, M.V.D., Camatti, C., Macambira, M.B., Nunes, L.C. (2002). Precious and base-metal mineralization linked to Neoproterozoic granites in the Rio Grande do Sul Shield, southern Brazil: are they connected to the E-W Camaquã Lineament. In: 41 Congresso Brasileiro de Geologia, 2002, João Pessoa. *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*.
- Rollinson, H. (2014). *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*. Londres: Routledge.
- Santos, J.O.S., Chernicoff, C.J., Zappettini, E.O., Mcnaughton, N.J., Hartmann, L.A., (2017). Geographic and temporal extensions of the Río de la Plata Craton, South America and its metacratonic eastern margin. *International Geology Review*, 1–73.
- Silva Filho, B.C., Soliani Jr., E. (1987). Origem e Evolução dos Gnaisses Cambaí: exemplo de estudo integrado de análise estrutural, petroquímica e geocronologia. *Anais, III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Curitiba*, 1 (1987), pp. 127-145
- Soliani Jr., E., Fragoso Cesar, A. R., Teixeira, W., Kawashita, K. (1984). Panorama Geocronológico da Porção Meridional do Escudo Atlântico. In XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia (pp. 2435–2449). Rio de Janeiro.
- Soliani Jr., E. (1986). Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica. Universidade de São Paulo.
- Sun, S., McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313–345.
- Tickyj, H., Hartmann, L.A., Vasconcellos, M.A.Z., Philipp, R.P., Remus, M.V.D. (2004). Electron microprobe dating of monazite substantiates ages of major geological events in the southern Brazilian shield. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(8), 699–713.
- UFRGS. (2015). Mapa geológico de parte das folhas Vila Afonso Jacinto (SH-21-Z-D-III-1) e Ibaré (SH-21-Z-B-VI-3). (Mapa e Relatório Técnico). Porto Alegre.
- UFRGS (2016). Mapa geológico de parte da folha Ibaré (SH-21-Z-B-VI-3). (Mapa e Relatório Técnico). Porto Alegre.
- UFRGS (2017). Mapa geológico de parte das folhas Ibaré (SH-21-Z-B-VI-3) e Suspiro (SH-21-Z-B-VI-1). (Mapa e Relatório Técnico). Porto Alegre.
- UFRGS (2018). Mapa geológico de parte das folhas Suspiro (SH-21-Z-B-VI-1) e Lagoa da Meia-Lua (SH-21-Z-B-VI-2). (Mapa e Relatório Técnico). Porto Alegre.

- Weiss, Y., Class, C., Goldstein, S.L., Hanyu, T. (2016). Key new pieces of the HIMU puzzle from olivines and diamond inclusions. *Nature*, 537, 666-670
- Zindler A., Hart S. (1986). Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14, 493-571.

PARTE III

Carta de Aceitação



Willian Moraes <wilmoraes@gmail.com>

[GEOUSP] Agradecimento pela submissão

1 message

Daniel Machado <publigc@usp.br>
Reply-To: Daniel Machado <publigc@usp.br>
To: Willian Pedroso Moraes <wilmoraes@gmail.com>

Mon, Mar 2, 2020 at 12:07 PM

Willian Pedroso Moraes,

Agradecemos a submissão do trabalho "Isótopos de Sr e Nd na evolução do Complexo Santa Maria Chico, Cráton Río de la Plata, Sul do Brasil" para a revista Geologia USP. Série Científica.
Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão: <https://www.revistas.usp.br/guspsc/authorDashboard/submission/167272>
Login: wpmoraes

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Daniel Machado

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“GEOLOGIA ISOTÓPICA Sr-Nd DO COMPLEXO SANTA MARIA CHICO, CRÁTON RÍO DE LA PLATA”
Área de Concentração: Geoquímica
Autor: Willian Pedroso Moraes
Orientador: Prof. Dr. Edinei Koester
Examinador: Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory
Data: 29/07/2020
Conceito: B
PARECER:
<u>Parecer da dissertação de William Pedroso Moraes</u>
O trabalho trata sobre geologia de rochas antigas, pertencentes ao Complexo Santa Maria Chico, porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense (ESrg). O trabalho traz novos dados sobre as rochas da região, cumprindo o proposto nos objetivos, chegando aos resultados de acordo com os materiais e métodos propostos. Considerando isso, manifesto aprovação do trabalho. Porém, alguns problemas foram verificados no manuscrito, sendo elencados abaixo.
<u>Texto da dissertação:</u>
O principal problema do trabalho está na parte escrita, pois apresenta inúmeros erros de concordância e pontuação, tornando o texto muitas vezes confuso e/ou ininteligível. Alguns problemas de formatação também ocorrem, mas são pontuais.
Na parte da estrutura da dissertação, antes do artigo anexado, os problemas de escrita acima relatados são recorrentes. Há uso de siglas que não foram apresentadas no texto, dificultando a leitura de revisores não familiarizados com a área de estudo ou com o tema de pesquisa.
Algumas ilustrações estão com a resolução muito ruim. Além disso, ocorre que uma não foi citada no texto (Fig. 2), a qual tem problemas na legenda (unidades paleoproterozoicas e arqueanas no ESrg não estão de acordo com a legenda da figura). A Fig. 3 está com péssima resolução e não está traduzida. Além disso, não aparecem os pontos visitados no trabalho.
Na parte de Geologia Regional, por usar uma figura muito simplificada (Fig. 1), o texto não fica de acordo com o que consta na Fig. 3, omitindo desta forma algumas litologias de larga ocorrência no ESrg, principalmente na porção central. O texto é uma compilação de artigos, tornando o texto por vezes confuso e sem concatenação entre os parágrafos.
Nos Materiais e Métodos o texto está confuso, mal redigido e com mistura de informações.
As Referências têm alguns problemas: algumas estão fora da ordem alfabética, faltam algumas (incompleta), uma está fora de formatação e alguns autores e/ou anos estão incorretos. Geralmente não se cita CPRM nos mapas, mas sim o organizador do mapa (primeiro autor).
Nos Anexos consta uma “carta de aceitação”. Porém, o termo não estaria correto, pois o artigo não foi aceito. Trata-se de uma confirmação que o artigo foi submetido.
<u>Artigo submetido:</u>
No artigo submetido, no Abstract, consta que a área de estudo encontra-se na porção oeste do Cráton Rio de La Plata. Na verdade seria oeste do ESrg. Também há uma mistura das siglas que

foram utilizadas ora para as unidades em português, ora para unidades em inglês. Ocorre ainda o uso incorreto de pontuação, problemas de formatação e espaçamento e problemas na tradução para o inglês.

Na Introdução, como visto nos demais itens, há problemas de concordância e pontuação no texto, tornando o texto confuso. Em mapas geralmente não se cita a CPRM, mas sim o organizador do mapa.

No Contexto Geológico o texto continua confuso devido a problemas de pontuação, concordância e revisão. Há parágrafos de uma frase só, difíceis de serem entendidos.

A Fig. 1 tem problemas com a resolução e não tem referência bibliográfica. Ao longo do texto, e em outras figuras também, nota-se a falta de citações. Algumas referências estão com o ano incorreto. A descrição da chamada porção central do ESrg está incompleta. O uso do termo Cinturão Dom Feliciano usado no texto não confere com o apresentado na figura. A Fig. 3 está com baixa resolução. O contexto traz uma revisão/compilação de artigos. Ele não deixa clara a contextualização do trabalho proposto. A Fig. 3 não foi citada no texto.

Nos Materiais e Métodos o texto mal pontuado é, por vezes, confuso. Problemas com concordância, redação e revisão também são verificados. Faltam citações sobre os procedimentos de laboratório. O item está incompleto, pois falta a parte de petrografia.

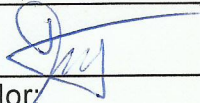
Nos Resultados continuam os mesmos problemas de redação, com texto mal pontuado e confuso, com parágrafos de uma frase só. Tem figuras que não são citadas no texto e algumas foram citadas de forma errada. Também nota-se o uso incorreto de alguns gráficos de geoquímica quanto à finalidade para a qual foram originalmente propostos. Novamente, ocorrem figuras com baixa resolução e as citações no texto não conferem com as figuras. Algumas frases estão sem sentido e com informações incorretas. Há frases muito compridas, sem devida pontuação, que estão confusas. Nas discussões ocorrem os mesmos problemas de escrita, gerando expressões confusas. Na parte inicial da discussão há um apanhado de dados e conclusões da literatura. Porém, não há uma concatenação com os resultados apresentados no trabalho. Esses dados já tinham sido apontados no início do trabalho, tornando-os repetitivos. Na expressão "milonitização pode ter tido sua composição isotópica de Nd alterada" é necessária alguma citação de trabalhos, pois é premissa deste sistema isotópico que ele mantém suas razões nos processos crustais.

Nas Referências há problemas com a ordem alfabética. Em mapas geralmente não se cita a CPRM, mas sim o organizador do mapa. Algumas estão com o ano incorreto. Outras estão faltando.

Em anexo, segue o PDF com alguns dos apontamentos acima listados.

Considerando o exposto, considero Nota B para o trabalho.

Assinatura:



Data:

04/08/2020

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

Tiago Rafael Gregori
Professor Adjunto
SIAPE: 2214633
UNIPAMPA - Caçapava do Sul



ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
" GEOLOGIA ISOTÓPICA Sr-Nd DO COMPLEXO SANTA MARIA CHICO, CRÁTON RIO DE LA PLATA "
Área de Concentração: Geoquímica
Autor: Willian Pedroso Moraes
Orientador: Prof. Dr. Edinei Koester
Examinador: Prof. Dr. Everton Marques Bongioiolo
Data: 17/03/2020
Conceito: A (EXCELENTE)
PARECER:
<p>A dissertação de Willian Pedroso Moraes é bem escrita e ilustrada. Raros erros de digitação/concordância facilitam a leitura e o entendimento do conteúdo por parte do leitor. É um trabalho importante e relevante no entendimento da evolução do Complexo Santa Maria Chico, sendo compatível com nível de mestrado.</p> <p>A "Parte I" é bem organizada e discute a relação das razões isotópicas estudadas no entendimento da evolução de rochas ortoderivadas, metamorfizadas ou não, introduzindo o leitor à temática da dissertação e fornecendo uma base importante para os conteúdos apresentados posteriormente. Apresenta ainda objetivos e uma boa compilação dos trabalhos anteriores na área de estudo. Os métodos de investigação utilizados são descritos de forma completa e compreensível. Faltam algumas referências na listagem.</p> <p>A "Parte II" contém um artigo científico submetido ao periódico Geologia USP – Série Científica (comprovação de submissão na Parte III). Pequenas correções serão certamente feitas pelos revisores, e não comprometem o conteúdo científico. Os aspectos de campo, petrográficos e isotópicos são bem discutidos, e as interpretações/conclusões são coerentes com os dados obtidos, em conjunto com dados da literatura. O texto finaliza demonstrando como a área de trabalho se insere no ambiente geológico/ contexto estudado.</p> <p>Seguem alguns comentários, correções e sugestões que espero sejam úteis na elaboração de trabalhos futuros.</p> <p>Parte I <i>Introdução</i></p> <p>No 2º parágrafo o autor afirma que o CSMC é composto por rochas paleoproterozoicas de alto grau e, na página seguinte (p. 34), que há discussões sobre esta afirmação. Sugerimos adicionar no início que "tem sido descrito como</p>

uma associação de rochas paleoproterozoicas de alto grau”, pois a afirmação do início confunde os leitores. Nesse sentido, o autor descreve bem a complexidade de nomenclaturas na pág. 37.

p. 12: geológico-geológico

p. 13: de de (1ª linha); metassedimentares

p. 16: tenha seja

p. 17: pórfiros de granada; legenda da figura 3: geste

Parte II (artigo)

p. 36: silimanita-gnaisses / Sugiro colocar um subtítulo na pág. 36 (Geologia da área / Trabalhos anteriores, ou algo similar), já que a partir desse ponto só se trata do CSMC, foco do trabalho.

p. 37: os termos “composição ultramáfica a máfica” e “composição félsica” não devem ser empregados pois esse é um parâmetro visual, não composicional, mesmo que empregado frequentemente na literatura. Adicionar “alcalinos” nas intrusões graníticas, o que é típico para extensão crustal, como descrito por Girelli *et al.* (2018).

p. 38: quais as relações estruturais e de contato entre as unidades, se há diferenças de natureza, idade e grau metamórfico? (ver mais comentários sobre esses tópicos a seguir)

p. 40: a versão impressa do mapa está em baixa qualidade, o que dificulta a identificação de estruturas (incluindo medidas) e unidades (cores), além do tamanho da fonte pequena. Entendemos a dificuldade de representação de tantas unidades, mas o mapa e a coluna poderia ser simplificados para a versão do artigo – com destaque para as unidades estudadas – e este mapa completo apresentado apenas como parte (anexo) da dissertação. A porção destacada em vermelho na coluna estratigráfica coloca Arqueano, Neoarqueano e Sideriano (Paleoproterozoico) lado a lado, verificar. Seria importante colocar o número das amostras no mapa, junto com os locais de coleta.

p. 42: Por que as rochas de composição granítica pertencem à “Associação Tonalítica-Trondhjemítica – ATT”? Além disso, uma questão descritiva importante tem relação às “lentes ultramáficas anfíbolíticas”. Esta dubiedade na descrição (utilizando a composição da rocha ou do protólito) é inerente a trabalhos em áreas metamorizadas com mudança de composição/neoformação de minerais e, portanto, sugiro explicar a opção de nomenclatura adotada no corpo do texto. Veja que as rochas ultramáficas descritas não são mais ultrabásicas (litogeoquímica e mineralogia), e descritivamente/modalmente são anfíbolitos.

p. 45: Entendo que os gnaisses graníticos são de mesma idade da ATT, porém não fica claro no texto se é isso mesmo ou se essas rochas são associadas aos “diques graníticos de 1,8 Ga” descritos na p. 37.

p. 46: sugiro aumentar o tamanho das fotos, isso deve ser solicitado pelos revisores do artigo.

p. 47: provavelmente os revisores vão solicitar que as análises litogeoquímicas da AP sejam excluídos do diagrama TAS. Poderiam ser plotadas as amostras disponíveis na literatura como comparação. Nestes e nos outros gráficos geoquímicos, as cores preta e cinza poderiam ser substituídas para facilitar a identificação das amostras.

p. 49: fica mais claro nos dois gráficos que as rochas de composição granítica devem ser individualizadas da ATT. Verificar quais são as amostras verdes/pretas

no campo cálcio-alcálico/peraluminoso. Elas têm alguma particularidade? É uma questão a pensar e discutir no grupo de pesquisa.

p. 50: alguns dos diagramas citados no 1º parágrafo não são mostrados na fig. 10.

Discussões

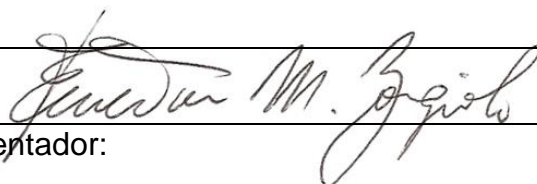
Acredito que a “idade de máxima deposição em 2,3 Ga” referida seja dos protólitos da AP. Nesse caso temos alguns pontos a avaliar.

Há rochas de 2,4 Ga em associação com rochas de 2,1 Ga, estas últimas sem certeza de que pertencem à ATT (idades de Girelli *et al.*, 2018). As ortoderivadas foram metamorfizadas em fácies granulito, assim como as de idade com máxima deposição em 2,3 Ga. A ATT (de idade 2,1 Ga) deve ser intrusiva nas AMU e AP, não? E nesse caso a colocação deve ter ocorrido após o pico metamórfico, pois ambas AMU e AP estão em fácies granulito. Por outro lado, o pico é datado como mais novo (2,06 Ga) do que a ATT. A ATT foi colocada tectonicamente na posição atual durante um evento mais novo que 2,06 Ga? Uma solução para resolver este problema seria (i) utilizar as mesmas amostras de Girelli *et al.* (2018) e/ou de outros trabalhos para diversas análises ou (ii) coletar novas amostras, controladas em campo com base nos mapeamentos de maior detalhe, para análises completas e coincidentes dos pontos de vista geocronológicos, geoquímicos e isotópicos.

Os dados isotópicos são uma grande contribuição ao entendimento da área de estudo e permitiram a identificação do manto primitivo como fonte magmática, com pouca participação crustal na evolução da AMU e ATT. Adicionalmente poderiam ser plotadas as amostras disponíveis na literatura como comparação. As conclusões integram os dados isotópicos, geoquímicos e geocronológicos para identificar evolução magmática-metamórfica distinta entre a AMU e a ATT.

Finalmente, parabéns ao mestrando e seu orientador pelo projeto de pesquisa.

Assinatura:



Data: 17/03/2020

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

PARECER

A Dissertação de Mestrado do aluno William Pedroso Moraes tem muito boa resolução no que diz respeito aos dados Sr-Nd, motivo principal do trabalho. Entretanto, como pode ser notado nas observações colocadas no texto, muitas correções devem ser efetivadas. Alguns parágrafos devem ser reescritos, tanto na Parte I quanto na Parte II, essa última relativa ao artigo submetido. Destacam-se no trabalho, as discussões e conclusões finais que mostraram: (i) as rochas AMU têm afinidade toleítica e (ii) as rochas ATT, afinidade cálcio alcalina. Segundo a interpretação do aluno, ambas se formaram em ambiente de arco que evoluiu para arco continental.

Faltou nesse trabalho estudos de geologia estrutural-tectônica, tanto na parte cratônica (Craton Rio de La Plata) quanto na parte do Cinturão Dom Feliciano. Consideramos esse fato importante para se compreender melhor o metamorfismo. Assim, se entendi bem, toda a área sofreu metamorfismo progressivo no Paleoproterozoico, alcançando até a fácies granulito (Craton Rio de La Plata). Por sua vez, no Neoproterozoico, devido às colisões, foi formado o Cinturão Dom Feliciano, onde predominou o metamorfismo regressivo, que retrogradou as rochas para a fácies anfíbolito. Gostaria que essa nossa observação fosse colocada para o aluno, para ver se ele concorda ou não.

Nas correções, chamei a atenção para o mapa da figura 3, Parte II, Nesse está assinalado que as rochas do CMSC são do Arqueano. Fiquei em dúvida? Elas são arqueanas ou paleoproterozoicas? Favor verificar. Então, recomenda-se a aprovação do candidato William Pedroso Moraes.

Esse é o nosso parecer,

Salvador, 13 de março de 2020.

Johildo S. F. Barbosa