

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia

Arianne de Souza Barbosa

Petrologia de rochas metamáficas e metaultramáficas da Sequência de Itaguara (sul do Cráton São Francisco – Minas Gerais): vestígios de litosfera oceânica paleoproterozoica?

Arianne de Souza Barbosa

PETROLOGIA DE ROCHAS METAMÁFICAS E METAULTRAMÁFICAS DA SEQUÊNCIA DE ITAGUARA (SUL DO CRÁTON SÃO FRANCISCO – MINAS GERAIS): VESTÍGIOS DE LITOSFERA OCEÂNICA PALEOPROTEROZOICA?

Versão final

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestra em Geologia Regional.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Oliveira Chaves

BELO HORIZONTE

2022

B238p
2022

Barbosa, Arianne de Souza.

Petrologia de rochas metamáficas e metaultramáficas da Sequência de Itaguara (sul do Cráton São Francisco – Minas Gerais) [manuscrito] : vestígios de litosfera oceânica paleoproterozoica? / Arianne de Souza Barbosa. – 2022.

54 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Alexandre de Oliveira Chaves.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2022.

Área de concentração: Geologia Regional.

Bibliografia: f. 51-52.

1. Ofiolitos – Teses. 2. Geoquímica – Minas Gerais – Teses. 3. Crátons – Teses. I. Chaves, Alexandre de Oliveira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. Sampaio. III. Título.

CDU: 550.4(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

Petrologia de rochas metamáficas e metaultramáficas da Sequência de Itaguara (sul do Cráton do São Francisco- Minas Gerais): vestígios de litosfera oceânica paleoproterozoica?

ARIANNE DE SOUZA BARBOSA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA REGIONAL, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aprovada em 24 de junho de 2022, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Alexandre de Oliveira Chaves – Orientador
UFMG

Prof. Daniel Andrade Miranda
UFES

Prof. Adolf Heinrich Horn
UFMG

Belo Horizonte, 24 de junho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha mãe e irmãos por me darem suporte a alcançar mais um degrau da minha carreira, e nunca terem me deixado desistir dos meus sonhos. Ao meu pai *in* memória.

Agradeço ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES), com o suporte financeiro, mostrando a importância de apoio aos jovens cientistas brasileiros.

Ao Prof. Dr. Alexandre de Oliveira Chaves agradeço pela orientação e pelo projeto de pesquisa Registro de subducção e colisão paleoproterozoica no interior do Cráton do São Francisco meridional.

À Universidade Federal de Minas Gerais, a Pró-reitoria de Pós-graduação e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia pela oportunidade dos estudos.

“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim, terás o que colher.”

- Cora Coralina

RESUMO

Sequências ofiolíticas são importantes testemunhos de antigas litosferas oceânicas e contribuem para a compreensão da evolução tectônica terrestre. Rochas metamáficas-metaultramáficas são encontradas entre as cidades de Itaguara e Crucilândia (Minas Gerais) no sul do Cráton do São Francisco, e compõem com os quartzitos, metacherts, formações ferríferas bandadas, mica-quartzo xistos e granito Córrego do Peixoto a Sequência de Itaguara (SI) Paleoproterozoica. Tais rochas evidenciam características similares a de sequências ofiolíticas, o que proporciona uma nova interpretação geológica para esta localidade. Através da geologia de campo, petrografia, geoquímicas buscou-se analisar as condições metamórficas que as rochas metamáficas-metaultramáficas da SI foram submetidas. As rochas metamáficas são anfibolitos com assinatura geoquímica E-MORB, compostos mineralogicamente por hornblenda, plagioclásio, quartzo e orto- e clinopiroxênio, tendo gabro como provável protólito. A presença de ortopiroxênio revela que os anfibolitos atingiram a fácies granulito, com retrometamorfismo em fácies anfibolito, dada a abundância de hornblenda e plagioclásio. As rochas metaultramáficas mostram metamorfismo e hidratação em variados graus de intensidade, havendo litotipos que revelam o protólito espinélio wehrilito pouco modificado e outros litotipos com a mineralogia primária de olivina, clinopiroxênio e espinélio completamente transformada para serpentina, clorita, tremolita, talco e minerais opacos. Diagramas binários tipo Harker sugerem cogeneticidade entre as rochas metamáficas e metaultramáficas da SI e ambas possivelmente faziam parte de uma litosfera oceânica que foi subductada e envolvida em um evento colisional paleoproterozoico entre os Complexos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim. Esta litosfera oceânica parece preservada como lasca ofiolítica nesse contexto geológico.

Palavras-Chave: Ofiolito. Sequência Itaguara. Metamáficas. Metaultramáficas. Geoquímica. Cráton do São Francisco.

ABSTRACT

Ophiolitic sequences are important evidence of ancient oceanic lithospheres, contributing to the understanding of terrestrial tectonic evolution. Metamafic-metaultramafic rocks are found between the cities of Itaguara and Crucilândia (Minas Gerais) in the south of the São Francisco Craton, and together with quartzites, metacherts, banded iron formations, mica-quartz schist and Córrego do Peixoto granite comprise the paleoproterozoic Itaguara Sequence (SI). Such rocks show characteristics similar to those of ophiolitic sequences, which provide a new geological interpretation for this locality. Through field geological data, petrography, geochemical, it was pursued to understand the metamorphic conditions under which metamafic-metaultramafic rocks of the Itaguara Sequence were submitted. The metamafic rocks are amphibolites with E-MORB geochemical signature, mineralogically composed of hornblende, plagioclase, quartz and ortho- and clinopyroxene, and having probably gabbro as protolith. The orthopyroxene reveals that amphibolite rock has reached granulite facies, and subsequently amphibolite facies retrograde metamorphism. The metaultramafic rocks show metamorphism and hydration in varying degrees of intensity, with lithotypes that reveal the spinel wehrlite protolith little modified and other lithotypes with the primary mineralogy of olivine, clinopyroxene and spinel completely transformed to serpentine, chlorite, tremolite, talc and opaque minerals. Binary Harker diagrams suggest cogeneticity between SI metamafic and metaultramafic rocks and both were possibly part of an oceanic lithosphere that was subducted and involved in a Paleoproterozoic collisional event between the Divinópolis and Campo Belo/Bonfim Complexes. This oceanic lithosphere appears to be preserved as an ophiolite in this geological context.

Keywords: Ophiolite. Itaguara Sequence. Metamafics. Metaultramafics. Geochemistry. São Francisco Craton.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. ARTIGO I: ANFIBOLITOS ITAGUARA COM ASSINATURA E-MORB: PROVÁVEIS INTEGRANTES DE OFIOLITOS PALEOPROTEROZOICOS DO SUL DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO	10
INTRODUÇÃO	11
ARCABOUÇO GEOLÓGICO	12
MATERIAIS E MÉTODOS	14
RESULTADOS	15
DISCUSSÃO	19
CONCLUSÕES	20
AGRADECIMENTOS	20
REFERÊNCIAS	20
3. ARTIGO II- PETROLOGIA, GEOQUÍMICA E TERMOBAROMETRIA DE ROCHAS METAULTRAMÁFICAS DA SEQUÊNCIA DE ITAGUARA (SETOR SUL DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO): POSSÍVEL FRAGMENTO DE MANTO LITOSFÉRICO OCEÂNICO PALEOPROTEROZOICO?	24
INTRODUÇÃO	25
ARCABOUÇO GEOLÓGICO	26
MATERIAIS E MÉTODOS	29
RESULTADOS	29
<i>Petrografia</i>	29
<i>Geoquímica</i>	32
<i>Termobarometria</i>	34
DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	35
AGRADECIMENTOS	39
REFERÊNCIAS	40
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

Dilek & Furnes (2011) definem ofiolitos como fragmentos alóctones do manto superior e das rochas da crosta oceânica, que foram adicionados à crosta continental por processos tectônicos. São associações rochosas constituídas do topo para base por sedimentos pelágicos, basaltos almofadados, enxames de diques doleríticos tabulares e rochas plutônicas máficas e ultramáficas (Gill, 2014), podendo ser encontrada em sua sequência completa ou apenas porções dela.

Uma sequência ofiolítica pode estar relacionada a não subducção em ambientes de margem continental, cadeias meso-oceânicas e pluma, ou fases de construção de crosta oceânica (Figura 1A). Os ofiolitos de margem continental possuem sua gênese atrelada a formação da bacia oceânica, caracterizado pela transição de crosta continental e oceânica, com pequeno aporte de magmas e uma assinatura geoquímica E-MORB (Figura 1C). Os ofiolitos de cadeia meso-oceânica (Figura 1A) são classificados pela proximidade em relação a pluma mantélica ou em relação a distância com a fossa oceânica e as suas assinaturas geoquímicas podem ser N-MORB, E-MORB ou C-MORB (contaminado por rochas crustais) (Figura 1C). Os ofiolitos do tipo pluma (Figura 1A) são gerados próximos as cadeias meso-oceânicas e em platôs oceânicos, diferenciando dos demais por espessas camadas de rochas vulcânicas e plutônicas, possuindo assinaturas geoquímicas de N-MORB a E-MORB (Figura 1C).

Uma sequência ofiolítica pode estar relacionada também à subducção em ambientes de suprassubducção e arcos-de-ilha, locais onde há o consumo da crosta oceânica (Figura 1B). Ofiolitos de zonas de suprassubducção são formados na parte superior das zonas de subducção, sendo desenvolvidos no início da subducção devido ao efeito *rollback*. No processo de subducção, quando uma das placas está mergulhando, a outra sofre um estiramento para compensar o espaço gerado. Assim, há a formação de crosta após o arco, se associando a rochas de bacias retroarco a antearco, com assinaturas geoquímicas MORB-IAB-Boninítica (Figura 1D). Os ofiolitos de arcos-vulcânicos são gerados em diferentes estágios da gênese do arco, sendo caracterizados por assinaturas geoquímicas entre toleítico e calcio-alcálico (Figura 1D).

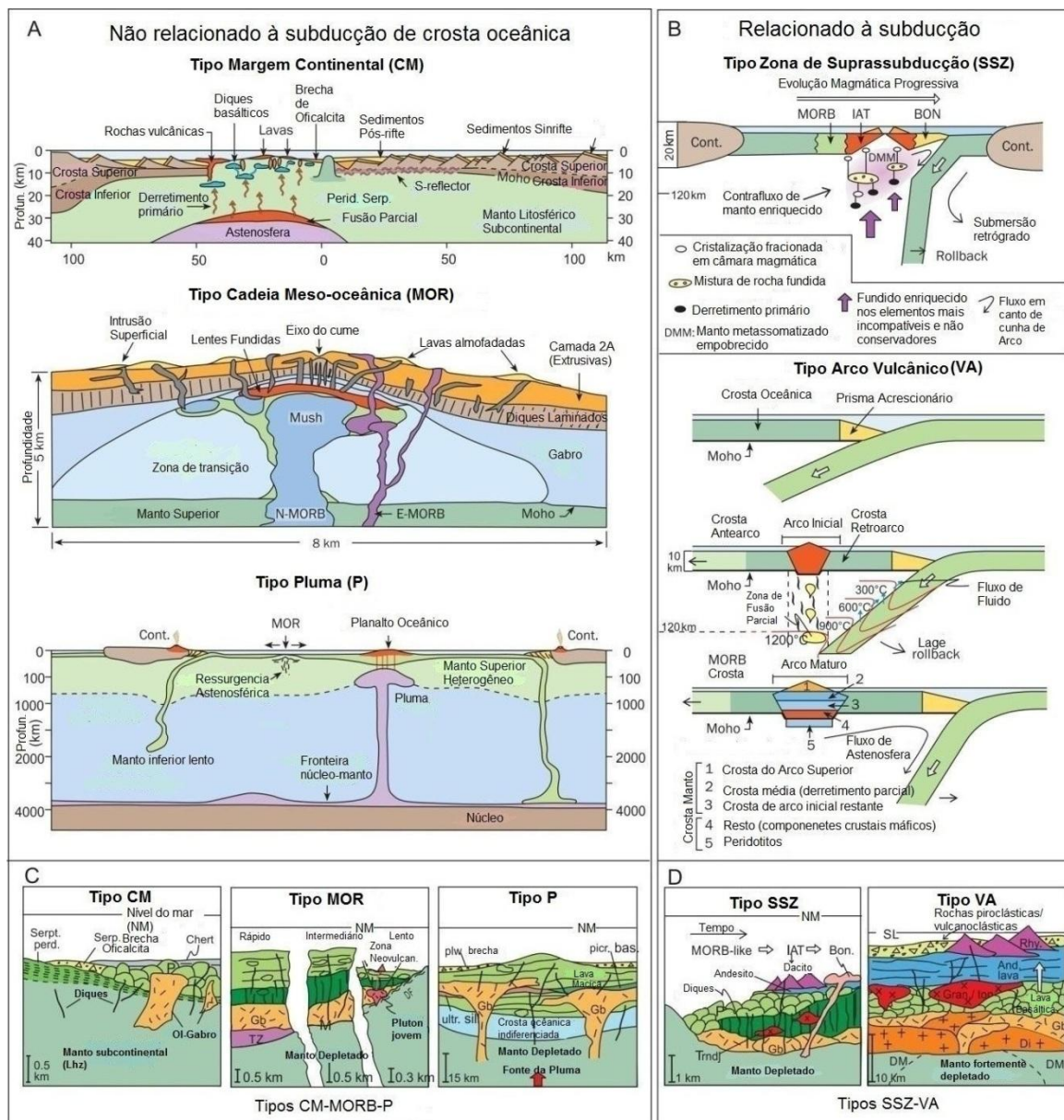


Figura 1- Ambientes e processos tectônicos de ofiolitos não relacionado à subducção (A) e relacionados à subducção (B); C-D seções colunares de ofiolitos com estruturas e arquiteturas simplificadas (Dilek & Furnes, 2011). MORB- basaltos de cadeias meso-oceânica; IAT- toléitos de arco de ilha; BON- boninitos; Perid. Serp. - peridotito serpentinizado; Serp. Brecha- brecha serpentinizada; P- Lava almofadada; Lhz- lherzolito; Ol-gabro- olivina gabro; Neovolcan- Neovulcânico; TZ- zona de transição; M- Moho; DF- falha de deslocamento; Gb- intrusões gabroicas a komatíticos; Ultr. Sill.- sill ultramáfico; Picr. bas.- basalto picrítico; Plw Brecha- lava almofadada brechada; And.- lava andesítica; Trndj.- intrusões trondjemíticas; Rhy.- riolito; And. Lava- lava andesítica; Gran./ton.- plútons de granito/tonalito; Gb-gabro; Di-dorito; DM- manto empobrecido (Dilek & Furnes, 2011).

Os ofiolitos do tipo acrescionário ocorrem em zonas de subducção-acresção em margens ativas, contêm fragmentos de qualquer um dos tipos citados anteriormente, e são localmente associados a rochas sedimentares pelágicas-hemipelágicas e sedimentos que preenchem as fossas tendo sido depositadas antes ou durante sua incorporação ao

prisma acrescionário. Este tipo de ofiolito possui uma variedade de metamorfismo, estilos de deformação, assinatura geoquímica e conjuntos litológicos diversos, uma vez que estão associadas a fatias tectônicas de rochas oceânicas deslocadas de placas descendentes (Dilek & Furnes, 2011).

Rochas máficas-ultramáficas ocorrem entre as cidades de Itaguara e Crucilândia-MG, no sul do Cráton do São Francisco, descritas primeiramente como Complexo Acamadado de Itaguara-Rio Manso (Gourlart, 2006). Posteriormente, Chaves et al. (2019), demonstraram que a associação de rochas dessa região está atrelada a uma sequência ofiolítica de idade Paleoproterozoica, conhecida como Sequência de Itaguara (SI).

Diante das várias possibilidades de ocorrência que as sequências ofiolíticas sugerem como apresentado na figura 1, este estudo busca contribuir para a elucidação da evolução tectônica da SI. Para isso, amostras das rochas metamáficas e metaultramáficas foram descritas e coletadas em campo. Em laboratório foram feitas lâminas delgadas para análise microscópica e análises geoquímicas para averiguar a composição da rocha total, sendo estes dados interpretados para a confecção de dois artigos científicos apresentados no corpo dessa dissertação.

O primeiro artigo- *Anfibolitos Itaguara com assinatura E-MORB: prováveis integrantes de ofiolitos paleoproterozoicos do sul do Cráton do São Francisco* foi publicado na Revista de Geociências da UNESP e o segundo artigo- *Petrologia, geoquímica e termobarometria de rochas metaultramáficas da Sequência de Itaguara (Setor sul do Cráton do São Francisco): possível fragmento de manto litosférico oceânico paleoproterozoico?* Encontra-se submetido a mesma revista e não foi publicado até a data da defesa.

O primeiro artigo caracteriza as rochas metamáficas a partir da sua petrografia e geoquímica. O segundo artigo aborda a petrografia, geoquímica e termobarometria das rochas metaultramáficas e ambos sugerem que os litotipos estudados possuem gênese associada e podem estar correlacionados a uma zona de sutura Paleoproterozoica, que ocorreu no sul do Cráton do São Francisco.

2. ARTIGO I: ANFIBOLITOS ITAGUARA COM ASSINATURA E-MORB: PROVÁVEIS INTEGRANTES DE OFIOLITOS PALEOPROTEROZOICOS DO SUL DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO

ITAGUARA AMPHIBOLITES WITH E-MORB SIGNATURE: PROBABLE MEMBERS OF PALEOPROTEROZOIC OPHIOLITES FROM SOUTHERN SÃO FRANCISCO CRATON

Introdução
 Arcabouço geológico
 Materiais e métodos
 Resultados
 Discussão
 Conclusão
 Agradecimentos
 Referências

RESUMO Os ofiolitos são litotipos oriundos da crosta oceânica que são posicionados em terrenos continentais através de processos colisionais. Uma sequência ofiolítica é caracterizada do topo para base por metassedimentos pelágicos, rochas metabásicas, metagabros e metaultramáficas. No sul do cráton do São Francisco, entre as cidades de Itaguara e Crucilândia (Minas Gerais- Brasil), está situada a Sequência de Itaguara composta por quartzitos, xistos, formações ferríferas bandadas, orto-anfibolitos e metaultramáficas de idade paleoproterozoica. O presente trabalho apresenta dados petrográficos e química de rocha total dos anfibolitos da Sequência de Itaguara. Mineralogicamente são constituídos por orto- e clinopiroxênio, plagioclásio, hornblenda e quartzo, tendo gabro como protólito. Os dados litogeoquímicos revelam uma afinidade toleítica e uma assinatura E-MORB, posicionando-os como provenientes de crosta oceânica. Sugere-se aqui que os anfibolitos Itaguara estariam associados à base de uma sequência ofiolítica paleoproterozoica. Esta sequência está associada a uma possível bacia oceânica que foi subductada no evento orogenético Riacciano-Orosiriano entre os Complexos Metamórficos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim, onde restos de khondalito, prisma acrescionário e retroeclogite são encontrados.

Palavras-chave: Anfibolito Itaguara. Ofiolito. Geoquímica. Petrografia. Cráton São Francisco.

ABSTRACT Ophiolites are lithotypes from the oceanic crust that are positioned on continents through collisional processes. An ophiolitic sequence is characterized from top to bottom by pelagic metasediments, metabasic rocks, metagabbros and metaultramafic rocks. In the south of the São Francisco craton, between the cities of Itaguara and Crucilândia (Minas Gerais-Brazil), the Itaguara Sequence is located, composed of quartzites, schists, banded iron formations, ortho-amphibolites and metaultramafic rocks of paleoproterozoic age. The present work presents petrographic and whole total chemistry data of amphibolites from the Itaguara Sequence. The Itaguara amphibolites have gabbro as protolith and are constituted by ortho- and clinopyroxene, plagioclase, hornblende and quartz. The lithogeochemical data reveal a tholeiitic affinity and an E-MORB signature, positioning them as coming from oceanic crust. It is suggested here that the Itaguara amphibolites would be associated with the base of a paleoproterozoic ophiolitic sequence. This sequence is associated with a possible ocean basin that was subducted in the Rhyacian-Orosirian orogenetic event between the Divinópolis and Campo Belo/Bonfim Metamorphic Complexes, where remnants of khondalite, accretionary prism and retroeclogite occur.

Keywords: Itaguara Amphibolite. Ophiolite. Geochemistry. Petrography. São Francisco Craton.

INTRODUÇÃO

Segundo Dilek & Furnes (2011), ofiolitos são entidades tectônicas importantes na compreensão de processos geológicos em cadeias meso-oceânicas (onde são gerados ao longo de limites divergentes de placas) e em zonas de subducção sucedida por colisão continental (onde são metamorfisados ao longo de limites convergentes de placas). Para Ramos & Koester (2015), os ofiolitos são fatias de peridotitos serpentinizados do manto superior geneticamente relacionados a rochas da crosta oceânica. Os ofiolitos são posicionados em terrenos continentais através de processos colisionais, sendo assim incorporados em cinturões orogenéticos (Boschi et al., 2006). Do topo para base, os ofiolitos são caracterizados por possuírem uma primeira camada de metassedimentos pelágicos, uma segunda camada composta por rochas metabasálticas (antigas lavas almofadadas e diques), uma terceira camada com metagabros na base da crosta oceânica e a última camada, já no manto, com rochas metaultramáficas (Winter, 2001). Ofiolitos têm sido identificados em diferentes partes do mundo, com idades variando de Arqueana a Cenozoica (Dilek & Robinson, 2003).

No sul do Cráton do São Francisco (CSF), entre as cidades de Itaguara e Crucilândia (Minas Gerais-Brasil), ocorre uma sequência de rochas metamáficas e metaultramáficas, contendo anfibolitos com idade de cristalização (U-Pb em zircão) de 2159 ± 21 Ma e idade de recristalização metamórfica entre 2060 Ma e 2030 Ma (Goulart & Carneiro, 2010) que estão relacionadas a uma provável paleo-subducção seguida pela colisão continental entre os Complexos Divinópolis e Campo Belo-Bonfim durante o Paleoproterozoico, colisão esta que preservou a provável sequência ofiolítica de Itaguara (Chaves et al., 2019). Chaves & Porcher (2019) adicionalmente identificaram retroeclogitos na Sequência de Itaguara (SI), os quais revelam idade de eclogitização de 2194 ± 55 Ma com pico metamórfico entre 17 e 20 kbar e $\sim 600-700$ °C ocorrido há ~ 2100 Ma durante a colisão continental. Rochas metassedimentares da SI, com pico metamórfico que atingiu $\sim 18,5$ kbar e ~ 650 °C há ~ 2050 Ma durante a mesma colisão continental, seriam remanescentes de um provável prisma acrescionário associado aos prováveis ofiolitos da SI, segundo Chaves et al. (2019).

Sob a luz destes estudos prévios sugestivos da presença de ofiolitos paleoproterozoicos no sul do CSF, esse artigo tem o objetivo de investigar as rochas

anfíbolíticas da SI através de dados petrológicos e geoquímicos para verificar se correspondem aos metagabros da base do que seria a provável sequência ofiolítica de Itaguara.

ARCABOUÇO GEOLÓGICO

O sul do CSF é constituído essencialmente por granitos, gnaisses e migmatitos envolvendo sequências do tipo Greenstone Belt (Supergrupo Rio das Velhas) de idade Arqueana, além de rochas clásticas-químicas metassedimentares (Supergrupo Minas, incluindo os itabiritos do Quadrilátero Ferrífero) do Paleoproterozoico e de rochas sedimentares pelito-carbonáticas (Grupo Bambuí) do Neoproterozoico (Figura 1) (Teixeira et al., 2000).

Diferentes complexos metamórficos compõe a porção arqueana do sul do CSF, sendo eles os Complexos Campo Belo/Bonfim, Belo Horizonte e Divinópolis (Figura 1), constituídas por gnaisses e migmatitos de composição tonalito-trondhjemitogranodiorito (TTG), cujos protólitos se formaram entre 3200 e 2600 Ma (Machado et al., 1992; Oliveira & Carneiro, 2001; Teixeira et al., 2000; Lana et al., 2013). Entre os períodos Riaciano e Orosiriano ocorreram eventos orogénicos entre o CSF e o Cráton do Congo, que ocasionaram a amalgamação de núcleos arqueanos e arcos de ilhas oceânicas e originaram o Cinturão Mineiro, que é um órogeno formado por suítes de granitóides de composição TTG, rochas plutônicas não deformadas como gabros, dioritos e granitos, além de vulcânicas e subvulcânicas (Teixeira et al., 2015).

O gnaiss migmatítico Itapecerica foi formado pelo retrabalhamento crustal do complexo de Divinópolis e de sequências supracrustais paleoproterozóicas durante a Orogenia Riaciano-Orosiriana. Com idade de 2,04 Ga, o migmatito Kinawa (Carvalho et al., 2017) do Complexo Itapecerica é um exemplo de crosta retrabalhada, em que metagranodioritos de 2,7 Ga foram parcialmente fundidos na Zona de Cisalhamento Cláudio (ZCC) durante o Paleoproterozoico. Segundo Coelho & Chaves (2019) a ZCC tem orientação NE-SW, caráter dextral e guarda khondalitos (rochas metapelíticas de alto grau metamórfico cujos protólitos são derivados de fundo oceânico) cujo pico metamórfico atingiu 850–950 °C e 10–11 kbar. A ZCC representa a sutura formada há 2011 ± 20 Ma entre os Complexos Campo Belo/Bonfim e Divinópolis (Coelho & Chaves, 2019; Chaves et al., 2019).

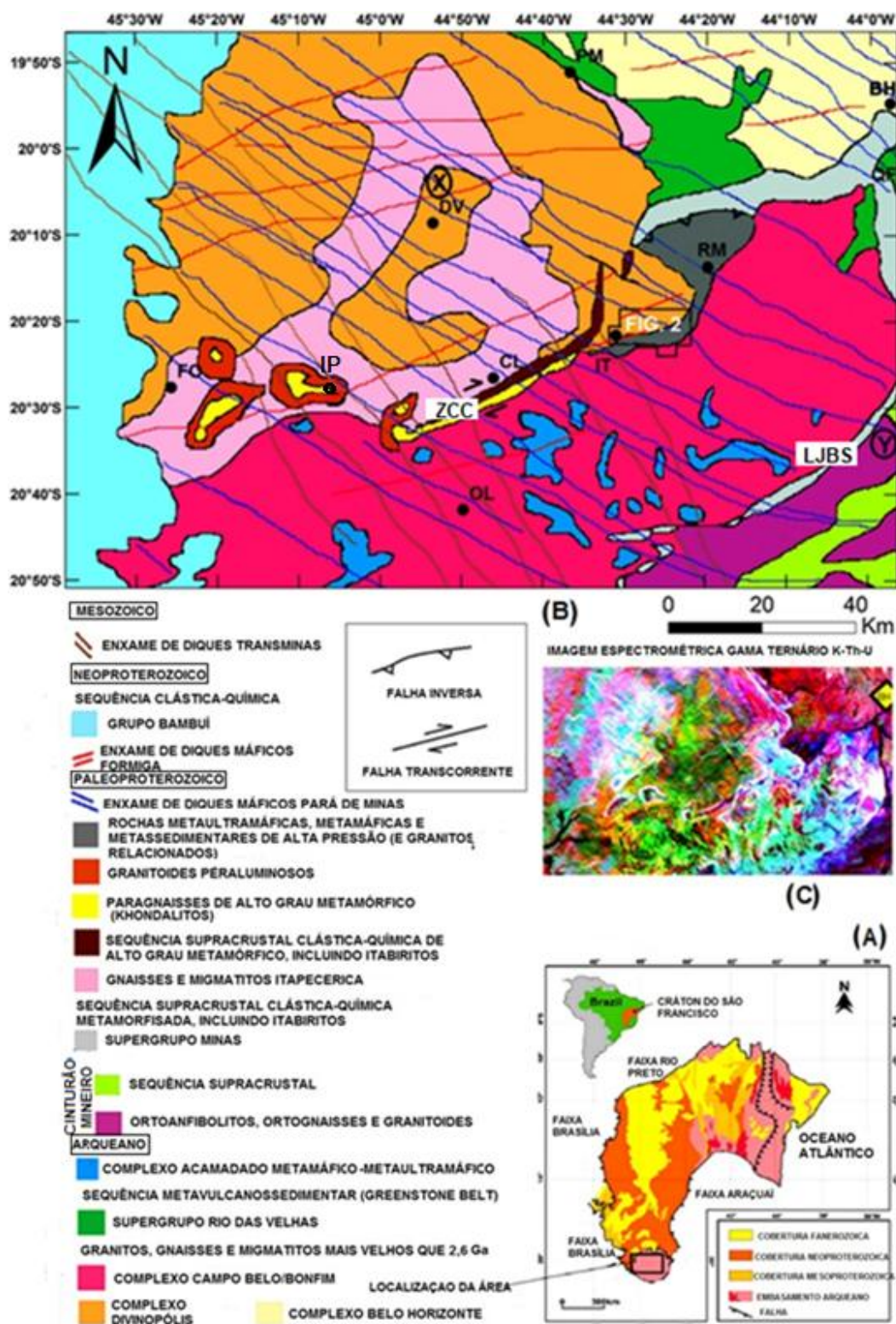


Figura 1- (A) O Cráton do São Francisco; (B) Mapa geológico do sul do Cráton do São Francisco (modificado de Chaves et al. 2019) QF- Quadrilátero Ferrífero; LJBS- Lineamento de Jeceaba-Bom Sucesso; ZCC-Zona de cisalhamento Cláudio; Cidades: BH- Belo Horizonte, PM- Pará de Minas, DV- Divinópolis, RM-Rio Manso, IT-Itaguara, FO-Formiga, CL-Claúdio, OL-Oliveira, IP- Itapecerica. (C) Imagem espectrométrica gama ternário K-Th-U do sul do Cráton do São Francisco.

Como um prolongamento da ZCC, a Sequência de Itaguara (SI) é uma sequência metamáfica-ultramáfica, composta por rochas metaperidotíticas e metagabróicas, rochas metassedimentares como formações ferríferas, quartzitos e mica-xisto, além do Granito Córrego Peixoto. Essas litologias são encontradas em um cinturão estreito NE-SW (Figura 2). Segundo Chaves et al. (2019), os quartzitos e mica-xisto representam um prisma acrescionário que se desenvolveu no Paleoproterozoico em uma zona de paleo-subducção na SI. Esse prisma acrescionário foi submetido a uma colisão entre os Complexos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim em ~2100-2050 Ma e seu pico metamórfico atingiu ~18 kbar e ~626 °C. Chaves & Porcher (2019) adicionalmente identificaram retroeclogitos na Sequência de Itaguara (SI), os quais revelam idade de eclogitização de 2194 ± 55 Ma com pico metamórfico entre 17 e 20 kbar e ~ 600-700 °C ocorrido durante a referida colisão continental.

A localização das amostras de anfibolito (triângulos pretos na fig.2) entre as cidades de Itaguara e Crucilândia, onde são encontrados gnaisses, migmatitos, metaultramáficas, anfibolitos, quartzitos, mica-quartzo xistos, granitos e formações ferríferas bandadas, está apresentada na figura 2. Diferentes gerações de diques máficos paleo- e neoproterozoicos (Chaves, 2013) cortam a área.

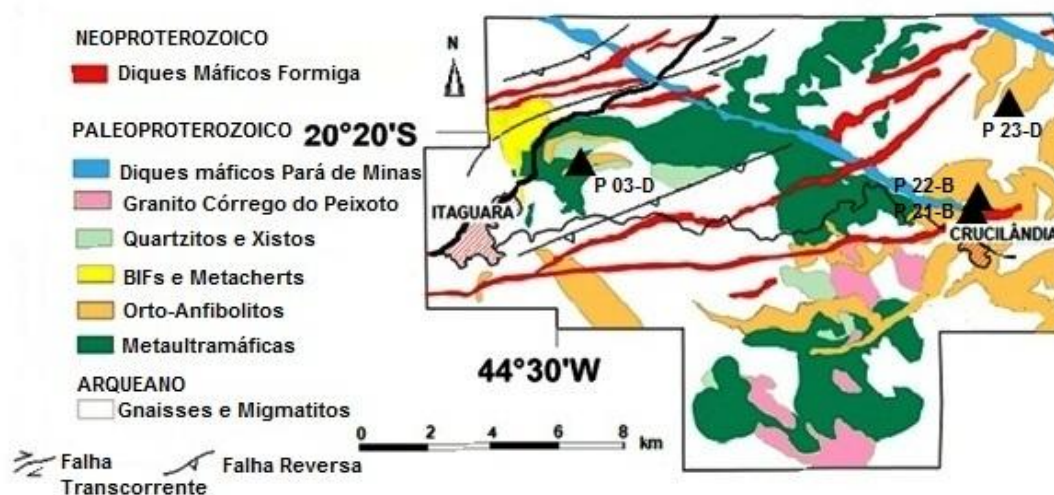


Figura 2- Mapa geológico da Sequência de Itaguara, com a localização das amostras de anfibolito estudadas (Modificado de Goulart & Carneiro, 2008 e Chaves et al., 2019).

MATERIAIS E MÉTODOS

Nos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC/UFMG) foram feitas seções delgadas das quatro amostras de anfibolito

localizadas na figura 2, descritas microscopicamente em microscópio Olympus BX-41. As análises de litogeoquímica dessas amostras foram realizadas no laboratório da SGS Geosol. As amostras foram analisadas por ICP-OES (Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado) e ICP-MS (Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado). A perda ao fogo (LOI) foi obtida após aquecimento a 1000 °C. Para o tratamento de dados geoquímicos foi utilizado o aplicativo Geoplot (Zhou & Li, 2006), como extensão no Microsoft Excel para os diagramas químicos. As abreviações minerais usadas a seguir são de acordo com Whitney & Evans (2010), sendo elas: Cpx- Clinopiroxênio, Hbl- Hornblenda, Opx-Ortopiroxênio, Pl-plagioclásio e Qz- quartzo.



Figura 3- (A) Amostra de rocha anfibolítica com textura granoblástica; (B) Afloramento de anfibolito; (C) Rocha anfibolítica com granulação fina.

RESULTADOS

Os afloramentos de anfibolito ocorrem como lajedos ou blocos esparsos em campo (Figura 3B). Em amostra de mão, o anfibolito assemelha-se a um metagabro (Figuras 3A e 3C) equigranular de granulação fina a média. Microscopicamente, essa rocha é composta por hornblenda (~40 %), plagioclásio (~35 %), clinopiroxênio (~10

%), quartzo (~10 %), ortopiroxênio (~2 %) e minerais acessórios como opacos, apatita e zircão (~3 %). A textura varia de granoblástica a nematogranoblástica, esta última marcada pela orientação dos cristais de hornblenda (Figura 4), os quais mostram pleocroísmo em tons verdes a amarronzados. O plagioclásio encontra-se recristalizado em forma de polígonos maclados, por vezes alterados para saussurita. O clinopiroxênio possui tons amarronzados e altera-se para hornblenda. O ortopiroxênio ocorre raramente. Os minerais opacos ocorrem disseminados, associados à hornblenda (Figura 4).

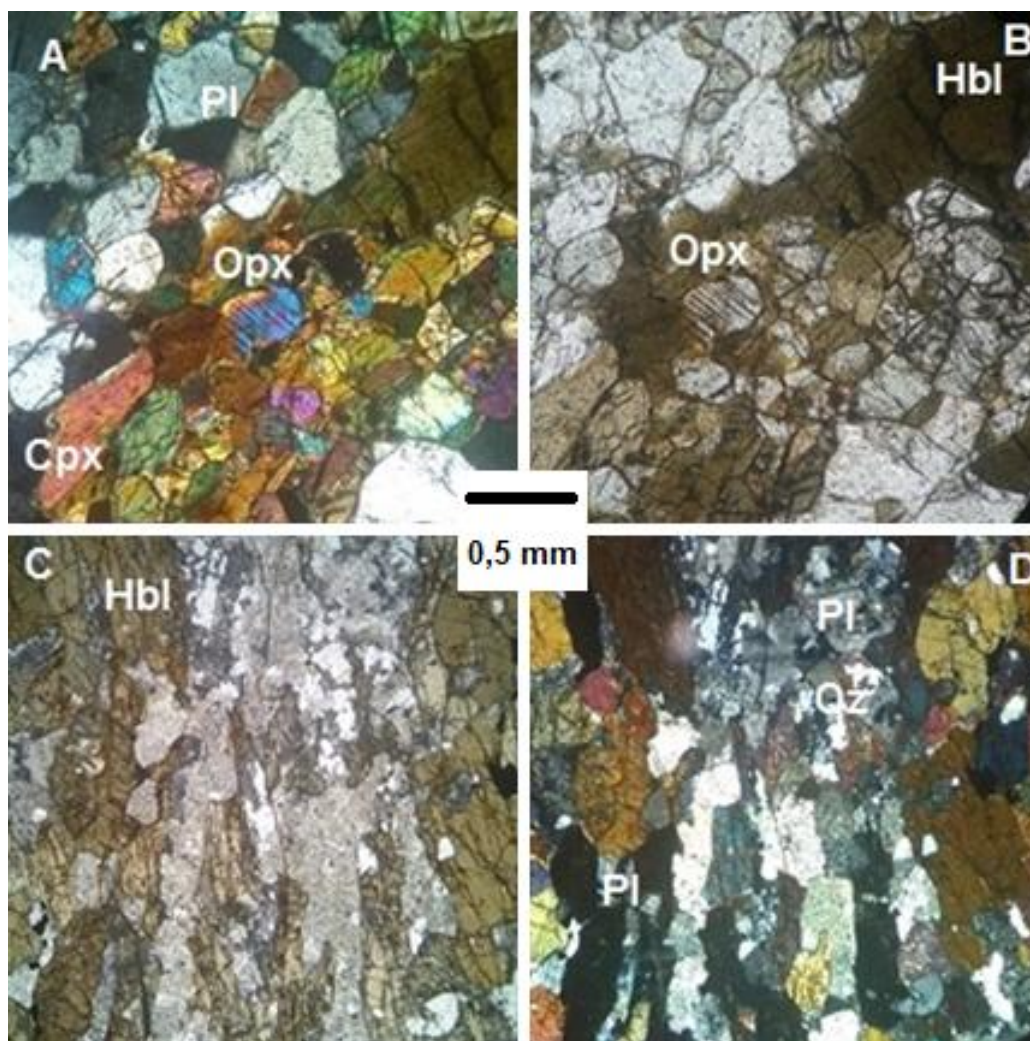


Figura 4- Fotomicrografias do anfibolito de Itaguara (sob polarizadores cruzados em A, D e sob polarizadores descruzados em B, C).

Os resultados da análise química de rocha total para as amostras de anfibolito estão listadas na tabela 1. Os valores dos elementos maiores, no geral, apresentam pequenas variações de SiO₂ (49,27-50,9 %), TiO₂ (1,55-2,56 %), Cr₂O₃ (0,01-0,03 %), Al₂O₃ (12,67-13,59 %), MnO (0,20-0,23 %), CaO (8,74-9,72 %), K₂O (0,96-1,13 %), Na₂O (1,87-2,48 %), P₂O₅ (0,10-0,26 %), tendo a maior variação o FeO_t (13,74-17,65

%) e o MgO (4,62-7,98 %).

Tabela 1- Composição química representativa dos anfibolitos da Sequência de Itaguara (óxidos em % por peso, traços e terras raras em ppm).

Amostra	Elementos maiores (%)												Total		
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeOt	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI			
Limite de detecção 0,01%															
P 03-D	50,90	1,55	13,59	0,02	14,74	6,25	0,21	9,65	1,89	0,96	0,10	1,08	100,94		
P 21-B	49,27	1,93	12,68	0,03	13,74	7,98	0,22	9,72	2,48	0,97	0,21	0,76	99,99		
P 22-B	49,29	2,33	13,56	0,01	16,40	4,62	0,20	8,98	1,87	1,13	0,26	0,61	99,26		
P 23-D	49,70	2,56	12,67	0,01	17,65	4,75	0,23	8,74	2,08	1,04	0,26	0,55	100,28		
Elementos traços (ppm)															
	Rb	Ba	Sr	Zr	Nb	Y	Ni	Co	Hf	Ta	Th	U	V	Cu	Ga
Limite detecção	0,20	10,00	10,00	10,00	0,05	0,05	5,00	0,50	0,05	0,05	0,10	0,05	5,00	5,00	0,10
P 03-D	68,90	157,00	127,00	110,00	6,97	45,80	61,00	44,50	3,12	0,05	1,90	0,66	320,00	159,00	19,40
P 21-B	72,80	78,00	161,00	169,00	6,43	30,05	109,00	69,40	3,29	0,61	2,60	1,10	350,00	185,00	20,90
P 22-B	38,50	212,00	121,00	235,00	13,00	46,08	61,00	55,70	6,04	0,18	6,30	1,84	365,00	55,00	20,40
P 23-D	39,90	210,00	123,00	227,00	14,26	47,09	76,00	57,40	6,03	0,19	8,10	1,92	359,00	58,00	20,60
Elementos terras raras (ppm)															
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Limite detecção	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05	
P 03-D	18,10	25,90	4,45	19,40	5,00	1,71	6,75	1,15	7,95	1,61	4,67	0,73	4,60	0,68	
P 21-B	12,60	26,00	3,39	17,40	4,90	1,59	5,79	0,86	6,36	1,17	3,89	0,48	3,70	0,48	
P 22-B	24,80	49,80	6,62	27,50	7,40	2,00	7,91	1,24	8,48	1,72	5,14	0,70	4,90	0,67	
P 23-D	27,50	54,10	7,71	31,00	8,90	2,12	8,55	1,58	9,91	2,12	6,21	0,98	7,00	0,93	

No diagrama SiO₂ vs Zr/TiO₂*0.0001 (Winchester & Floyd, 1977- Fig. 5A), o protólito do anfibolito é classificado como basalto subalcalino e, no diagrama (Na₂O+K₂O)-FeOt-MgO (Irvine & Baragar, 1971- Fig. 5B), ele se situa no domínio toleítico. No diagrama V vs Ti/1000 (Shervais, 1982- Fig. 5C), o protólito do anfibolito é classificado como do tipo MORB (basaltos de dorsais meso-oceânicas). Nos diagramas binários TiO₂/Yb vs Nb/Yb (Pearce, 2008- Fig.6A) e Y/Nb vs Zr/Nb (Xia & Li, 2019- Fig.6B), as amostras analisadas mostram composição de basalto tipo E-MORB (basaltos de dorsais meso-oceânicas do tipo enriquecido).

O padrão das amostras de anfibolito no diagrama de elementos incompatíveis normalizados ao N-MORB (Figura 7A) é no geral semelhante ao padrão dos E-MORB, com anomalias negativas de Ba, Sr, Nb e Ta. O padrão de distribuição dos elementos terras raras das amostras de anfibolito também se assemelha ao padrão dos E-MORB (Figura 7B).

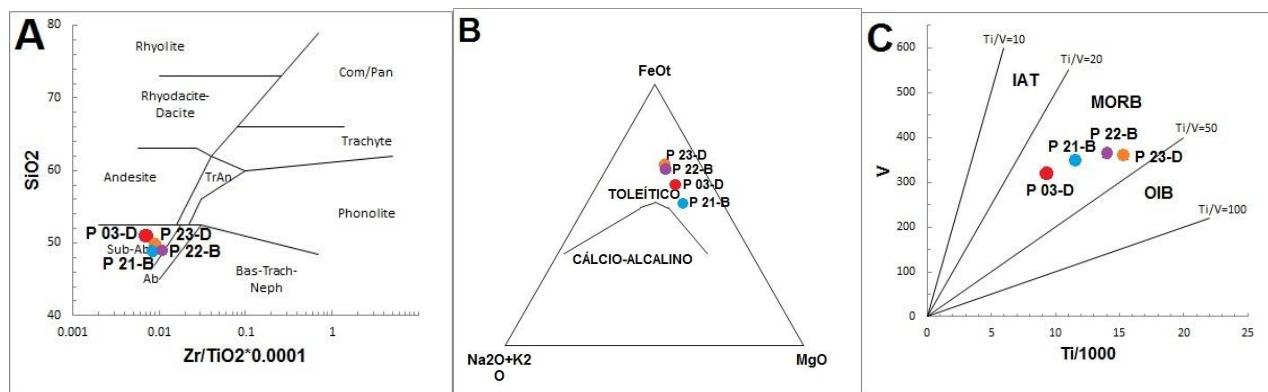


Figura 5-(A) Diagrama SiO_2 vs $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \cdot 0.0001$ (Winchester & Floyd, 1977); (B) Diagrama $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{-FeOt-MgO}$ (Irvine & Baragar, 1971); (C) Diagrama V vs $\text{Ti}/1000$ (Shervais, 1982), IAT- toleítos de arcos de ilha, MORB- basaltos da dorsal meso-oceânica, OIB-basaltos de ilha oceânica.

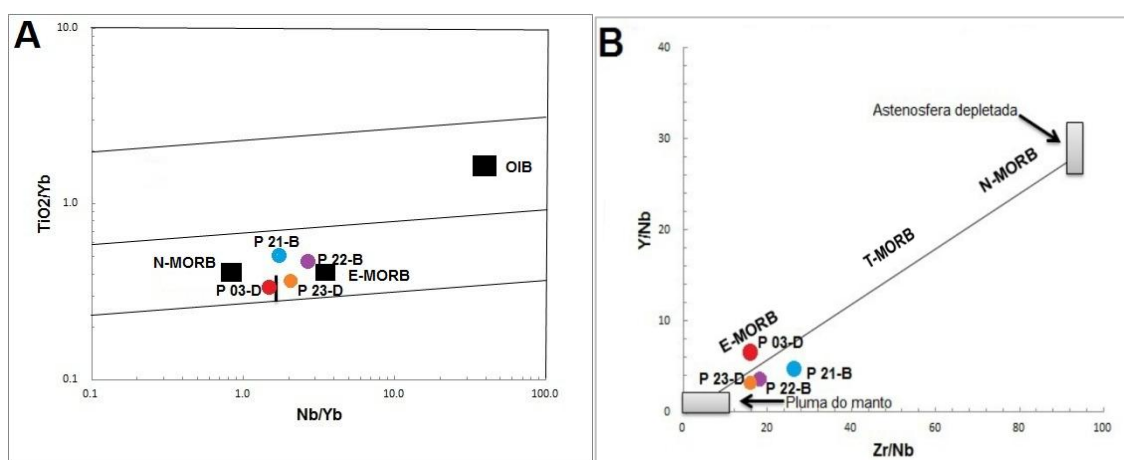


Figura 6-(A) Diagrama binário TiO_2/Yb vs Nb/Yb (Pearce, 2008); (B) Diagrama binário Y/Nb vs Zr/Nb (Xia & Li, 2019), E-MORB, T-MORB e N-MORB são respectivamente basaltos enriquecidos, transicionais e normais da dorsal meso-oceânica. OIB – basaltos de ilhas oceânicas.

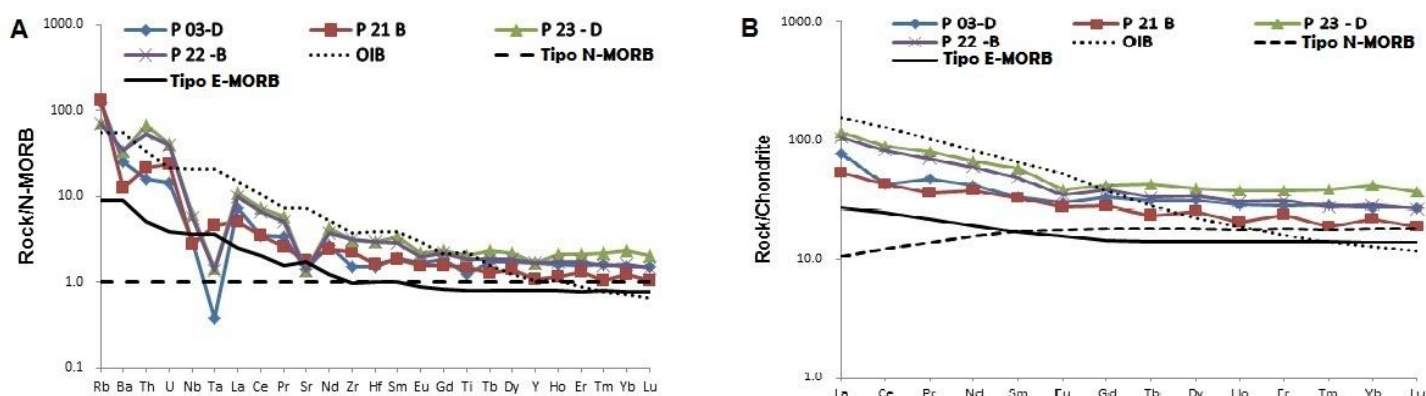


Figura 7- (A) Diagrama de elementos incompatíveis normalizados pelos valores de N-MORB de Sun & McDonough (1989). (B) Diagrama de elementos terras raras normalizados ao condrito de Sun & McDonough (1989).

DISCUSSÃO

Ofiolitos são gerados ao longo de limites divergentes de placas em cadeias meso-oceânicas e a intensa circulação hidrotermal ao longo de tais cadeias teria promovido a hidratação das rochas gabroicas da sequência ofiolítica, datadas em 2159 ± 21 Ma (Goulart & Carneiro, 2010), levando à alteração parcial dos clinopiroxênios para minerais como cloritas e anfibólios hidratados em ambiente de baixa pressão e temperatura (Boschi et al., 2006). Durante o metamorfismo em zona de subducção, o aumento da pressão e temperatura causa desidratação de cloritas e anfibólios, liberando fluidos ricos em Nb, Ta, Ba e Sr (Liang et al., 2009), levando ao surgimento de anomalias negativas desses elementos na rocha investigada (Figura 7A).

Com a colisão continental ocorreu à formação do ortopiroxênio (Figura 4) nos anfibolitos da Sequência de Itaguara (SI), durante o pico metamórfico a que a rocha foi submetida entre 2060 Ma e 2030 Ma (idades obtidas por Goulart & Carneiro, 2010). Em seguimento ao processo colisional, havia a exumação tectônica responsável por reações retrometamórficas, como a do surgimento de hornblenda e quartzo (Winter, 2014) decorrente da descompressão associada à exumação: $Pl + Cpx + Opx + H_2O = Hbl + Qz$.

Miranda & Chaves (2021) encontraram, no mesmo contexto orogênico paleoproterozoico, rochas anfibolíticas com assinatura E-MORB na região de Itapecerica no sul do CSF e sugeriram para a região a configuração de uma sequência ofiolítica, na qual os anfibolitos representam os gabros desta sequência.

Os anfibolitos da SI têm como protólito gabros com assinatura E-MORB (Figuras 6 e 7) que devem ter participado de uma provável paleo-zona de subducção entre os complexos metamórficos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim durante o Paleoproterozoico. A figura 8 ilustra o desenvolvimento da subducção e a posterior zona de sutura, que são reforçados com dados de Chaves et al. (2019) e Chaves & Porcher (2020), os quais respectivamente revelaram a existência de cunha acrescionária e eclogitos durante o Paleoproterozoico na mesma SI. A orogenia Riachão-Orosiriana do setor sul do CSF é parte de extensos orógenos colisionais moldados durante a edificação do supercontinente Columbia (Nuna), com nova proposta de configuração proposta por Chaves (2021).

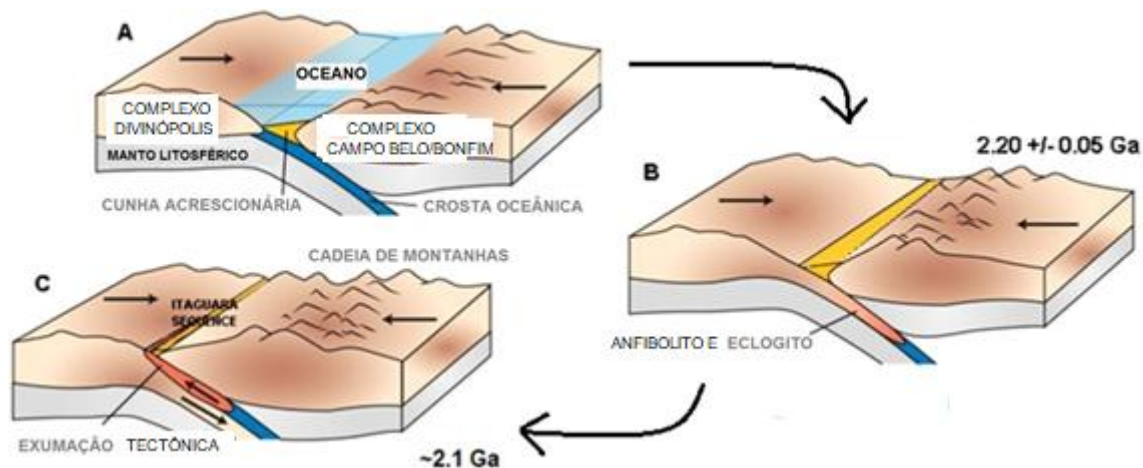


Figura 8- A, B, C- Evolução geológica da região do Itaguara em ~2200-2100 Ma durante a subducção, anfibolitização/eclogitização da litosfera oceânica com assinatura E-MORB, seguida pela colisão entre os Complexos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim no sul do Cráton do São Francisco (adaptado de Chaves & Porcher, 2020), ao longo da seção X-Y da Fig. 1.

CONCLUSÕES

Os anfibolitos da SI tiveram como protólito gabros com assinatura E-MORB e esses gabros provavelmente pertenceram a uma sequência ofiolítica da paleo-zona de subducção paleoproterozoica na região de Itaguara no sul do CSF. Considerando a ocorrência de rochas anfibolíticas de mesma assinatura E-MORB na região de Itapeçerica (Figura 1B), os dados da presente pesquisa reforçam a proposta regional da existência de uma possível zona de sutura continental paleoproterozoica formada pela colisão entre os complexos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim durante a orogenia Riaciano-Orosiriana, através do fechamento de uma bacia oceânica previamente existente entre esses complexos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do Instituto de Geociências (IGC-UFMG) e do CPMTC. O segundo autor agradece a bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq.

REFERÊNCIAS

- BOSCHI, C.; FRUH-GREEN, G. L.; ESCARTIN, J. Occurrence and significance of serpentinite-hosted, talc and amphibole-rich fault rocks in modern oceanic settings and ophiolite complexes: an overview. *Ophioliti*, v. 31, n.2, p. 129-140, 2006.
- CARVALHO, B.B.; JANASI, V.A.; SAWYER, E.W. Evidence for Paleoproterozoic

- anatexis and crustal reworking of Archean crust in the São Francisco Craton, Brazil: a dating and isotopic study of the Kinawa migmatite. **Precambrian Research**, v. 291, p. 98-118, 2017.
- CHAVES, A.O. Mafic dyke swarms of Minas Gerais—the state of the art [Enxames de diques máficos de Minas Gerais—o estado da arte]. **Geonomos**, v. 21, n. 1, p. 29–33, 2013.
- CHAVES, A.O.; GOULART, L.E.A.; COELHO, R.M.; MIRANDA, D.A., ARANDA, R.O.; RAMOS, S.L.L.M. High-pressure eclogite facies metamorphism and decompression melting re-recorded in paleoproterozoic accretionary wedge adjacent to probable ophiolite from Itaguara (southern São Francisco Craton-Brazil). **Journal South American Earth Sciences**, v. 94, 102226. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102226>, 2019.
- CHAVES, A.O. & PORCHER, C.C. Petrology, geochemistry and Sm-Nd systematics of the Paleoproterozoic Itaguara retroeclogite from São Francisco/Congo Craton: one of the oldest records of the modern-style plate tectonics. **Gondwana Research**, v. 87, p. 224-237, 2020.
- CHAVES, A.O. Columbia (Nuna) supercontinent with external subduction girdle and concentric accretionary, collisional and intracontinental orogens permeated by large igneous provinces and rifts. **Precambrian Research**, v. 352, p. 106017, 2021.
- COELHO, R.M. & CHAVES, A.O. Pressure-temperature-time path of Paleoproterozoic khondalites from Claudio shear zone (southern São Francisco craton, Brazil): Links with khondalite belt of the North China craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 94, Doi: 102250, 2019.
- DILEK, Y. & ROBISON, P. T., Ophiolites in Earth history: introduction. **Geological Society London Special Publications**, v.218, p. 1-8, 2003.
- DILEK Y. & FURNES H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. **Geological Society of America Bulletin**. v. 23, n. ¾; p. 387-411, 2011.
- GOULART, L.E.A. & CARNEIRO, M.A. General characteristics and lithochemistry of the Itaguara layered (ultramafic-mafic) sequence, southern São Francisco Craton. **Geochimica Brasiliensis**, v. 22, p. 045–072, 2008.
- GOULART, L.E.A. & CARNEIRO, M.A. Magmatismo máfico-ultramáfico Paleoproterozoico no cráton São Francisco meridional: a sequência acamadada Itaguara. In: 45° CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Belém. **Anais**.

- Sociedade Brasileira de Geologia, 2010.
- IRVINE, T.N. & BARAGAR, W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, **Canadian Journal Earth Sciences**, v.8, p. 523-548, 1971.
- LANA, C.; ALKIMIN, F.F.; ARMSTRONG, R.; SCHOLZ, R.A.C., ROMANO, R.; NALINI Jr., H.A. The ancestry and magmatic evolution of Archean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. **Precambrian Research**. v. 231, p. 157-173, 2013.
- LIANG, J.L.; DING, X.; SUN, X.M.; ZHANG, Z.M.; ZHANG, H.; SUN, W.D. Nb/Ta fractionation observed in eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling Project. **Chemical Geology**, v. 268, p. 27–40, 2009.
- MACHADO, N.; NOCE, C.M.; LADEIRA, E.A.; BELO DE OLIVEIRA, O.A. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero Southern São Francisco craton, Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v. 104, p. 12221-12227, 1992.
- MIRANDA, D.A. & CHAVES, A.O. Itapeçerica metamafic-ultramafic rocks with E-MORB signature: ophiolitic remnants of the rhyacian-orosirian orogeny in southern São Francisco craton? **Geociências**, v. 40, n. 1, p. 1-12, 2021.
- OLIVEIRA, A. H. & CARNEIRO, M. A. Complexo Metamórfico de Campo Belo: Evolução Tectônica de uma crosta sílica arqueana do sul do Cráton do São Francisco, Minas Gerais (Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 73, n. 3, Rio de Janeiro, 2001.
- PEARCE, J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. **Lithos**, v. 100, p. 14-48, 2008.
- RAMOS, R. C. & KOESTER, E. Lithochemistry of the meta-igneous units from Arroio Grande Ophiolitic Complex, southernmost Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 1, p. 65-78, 2015.
- RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. de registro geológico no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, v. 2, n.1, p.1-11, 1994.
- SHERVAIS, J.W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern ophiolitic lavas. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 59, n.1, p. 101-118, 1982.
- SUN, S.S. & McDONOUGH, W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts, implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D.,

- Norry, M. J., (Ed.). Magmatism in the ocean basins. **Geological Society of London**, London, v. 42, p. 313-345, 1989.
- TEIXEIRA, W.; ÁVILA, C. A.; DUSSIN, I.A.; CORREA NETO, A. V.; BONGIOLO, E. M.; SANTOS, J. O. S.; BARBOSA, N. S. A juvenile accretion episode (2.35-2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. **Precambrian Research**, v. 256, p. 158-169, 2015.
- TEIXEIRA, W.; SABATE, P.; BARBOSA, J.; NOCE, C. M.; CARNEIRO, M. A. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: Cordani, Milani, Thomaz Filho & Campos (Ed.). **Tectonic Evolution of South America**. 31st INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, Rio de Janeiro. p. 101-137, 2000.
- WHITNEY, D.L. & EVANS, B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. **American Mineralogist**, v. 95, n. 1, p. 185-187, 2010.
- WINCHESTER, J.A. & FLOYD, P.A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. **Chemical Geology**, v. 20, p. 325-343, 1977.
- WINTER, J.D. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. **Pearson Education**, 2 ed., p. 744, 2014.
- XIA, L. & LI, X. Basalt geochemistry as a diagnostic indicator of tectonic setting. **Gondwana Research**, v. 65, p. 43-67, 2019.
- ZHOU, J. & LI, X. Geoplot: an excel VBA program for geochemical data plotting. **Computers and Geosciences**, v. 32, p. 554-560. 2006.

3. ARTIGO II- PETROLOGIA, GEOQUÍMICA E TERMOBAROMETRIA DE ROCHAS METAULTRAMÁFICAS DA SEQUÊNCIA DE ITAGUARA (SETOR SUL DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO): POSSÍVEL FRAGMENTO DE MANTO LITOSFÉRICO OCEÂNICO PALEOPROTEROZOICO?

PETROLOGY, GEOCHEMISTRY AND THERMOBAROMETRY OF METAULTRAMAFIC ROCKS IN THE ITAGUARA SEQUENCE (SOUTH SECTOR OF THE SAO FRANCISCO CRATON): POSSIBLE FRAGMENT OF THE PALEOPROTEROZOIC OCEANIC LITHOSPHERIC MANTLE?

Introdução
 Arcabouço Geológico
 Materiais e Métodos
 Resultados
 Petrografia
 Geoquímica
 Termobarometria
 Discussão e Conclusões
 Agradecimentos
 Referências

RESUMO- A base de sequências ofiolíticas contém rochas ultramáficas do manto litosférico oceânico. Quando encontrados em terrenos continentais, esses litotipos evidenciam processos metamórficos que são registradas em sua mineralogia, composição química e texturas. No sul do Cráton do São Francisco, entre as cidades de Itaguara e Crucilândia (Minas Gerais-Brasil), está situada a Sequência de Itaguara (SI) composta por quartzitos, xistos, formações ferríferas bandadas, orto-anfibolitos e metaultramáficas, todos de idade paleoproterozoica. Este estudo apresenta dados petrográficos, geoquímicos e termobarometria de rochas metaultramáficas da Sequência de Itaguara. Mineralogicamente são compostas por serpentina (antigorita), tremolita, talco, clorita, olivina, espinélio, clinopiroxênio e minerais opacos, tendo espinélio wehrlito como protólito. Os dados termobarométricos e litogeoquímicos apontam respectivamente para serpentinização ocorrida abaixo de 500 °C e para semelhanças com serpentinitos paleoproterozoicos associados à subducção que são encontrados no Cráton do Congo. Possivelmente, as rochas metaultramáficas da SI faziam parte de uma bacia oceânica envolvida em processos de subducção e colisão continental no evento orogenético Riacciano-Orosiriano entre os Complexos Metamórficos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim.

Palavras-chave: Ofiolitos, Sequência de Itaguara, metaultramáficas, litogeoquímica, termobarometria.

ABSTRACT- The base of ophiolitic sequences contains ultramafic rocks from oceanic lithospheric mantle. When found in continental terrain, these lithotypes show metamorphic processes that are registered in their mineralogy, chemical composition and textures. In the south of the São Francisco Craton, between the cities of Itaguara and Crucilândia (Minas Gerais-Brazil), the Itaguara Sequence (SI) is located, and it is composed of paleoproterozoic quartzites, schists, banded iron formations, ortho-amphibolites and metaultramafics. This study presents petrographic, geochemical and thermobarometric data from metaultramafic rocks of the Itaguara Sequence. Mineralogically they are composed of serpentine (antigorite), tremolite, talc, chlorite, olivine, spinel, clinopyroxene and opaque minerals, with spinel wehrlite as protolith. Thermobarometry and lithogeochemistry data respectively point to serpentinization occurred below 500 °C and to similarities with subduction-related paleoproterozoic serpentinites found in the Congo Craton. Possibly, the SI metaultramafic rocks were part of an oceanic basin involved in subduction and continental collision processes of the Rhyacian-Orosirian orogenic event between the Divinópolis and Campo Belo/Bonfim Metamorphic Complexes.

Keywords: Ophiolite, Itaguara Sequence, metaultramafics, lithogeochemistry, thermobarometry.

INTRODUÇÃO

Os ofiolitos são uma sequência de rochas ultramáfica-máfica-sedimentar de origem oceânica, posicionadas na crosta continental através de estágios acrescionários e colisionais (Dilek & Robison, 2003). Os principais ambientes formadores de sequências ofiolíticas são dorsais meso-oceânicas, bacias de arcos-de-ilha juvenis, bacias de antearco e retroarco de arcos magmáticos. Ofiolitos podem ser classificados como (i) não relacionados à subducção gerados em ambientes de margem continental, cadeias meso-oceânicas e pluma, representando o estágio em que a crosta oceânica é construída e (ii) ofiolitos relacionados à subducção, que são subdivididos em zonas de suprassubducção e arcos de ilha, representando os estágios em que a crosta oceânica é consumida (Dilek & Robison, 2003). As rochas ultramáficas encontradas na porção basal de uma sequência ofiolítica constituem o manto litosférico oceânico original dessa sequência.

Sequências ofiolíticas preservam registros da evolução e distribuição de antigas litosferas oceânicas, as quais os tornam valiosos arquivos para a compreensão da evolução de orógenos, com processos de acreção e/ou colisão continental associados (Furnes et al., 2013). As rochas ultramáficas são residuais do manto litosférico, compostas por minerais anidros de altas temperaturas e pressões que, quando expostos no fundo oceânico ou sofrem subducção, podem ser alteradas por processos hidrotermais metassomáticos. Quando em seguida submetida a metamorfismo, gera novas assembleias contendo minerais hidratados em eventos progressivos ou por retrometamorfismo (Bucher & Grapes, 2011).

Terrenos pré-cambrianos possuem múltiplos registros de deformação e metamorfismo, os quais podem obliterar completamente as características originais das rochas, dificultando a sua identificação. Mapeamentos geológicos indicaram no sul do Cráton do São Francisco (CSF), entre as cidades de Itaguara e Crucilândia, a presença de rochas metamáficas e metaultramáficas na Sequência de Itaguara (SI) descrita por Goulart & Carneiro (2010). A SI é um conjunto de rochas com quartzitos, metacherts, xistos, formações ferríferas bandadas, orto-anfibolitos e metaultramáficas de idade paleoproterozoica que estão relacionadas à litoestratigrafia de um assoalho oceânico preservado durante processo colisional paleoproterozoico, segundo Chaves et al. (2019) e Chaves & Porcher (2020).

Este trabalho busca analisar a petrografia, litogeoquímica e termometria de rochas metaultramáficas da SI, cuja localização é apresentada a seguir (Figuras 1, 2), com o objetivo de verificar se essas rochas são de fato componentes de uma sequência ofiolítica paleoproterozoica.

ARCABOUÇO GEOLÓGICO

O sul do CSF é constituído essencialmente por granitos, gnaisses e migmatitos envolvendo sequências do tipo *Greenstone Belt* (Supergrupo Rio das Velhas) de idade Arqueana, além de rochas clásticas-químicas metassedimentares (Supergrupo Minas, incluindo os itabiritos do Quadrilátero Ferrífero) do Paleoproterozoico e de rochas sedimentares pelito-carbonáticas (Grupo Bambuí) do Neoproterozoico (Figura 1) (Teixeira et al., 2000).

Diferentes complexos metamórficos compõem a porção arqueana do sul do CSF, sendo eles os Complexos Campo Belo/Bonfim, Belo Horizonte e Divinópolis (Figura 1), constituídas por gnaisses e migmatitos de composição tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG), cujos protólitos se formaram entre 3200 e 2600 Ma (Machado et al., 1992; Oliveira & Carneiro, 2001; Teixeira et al., 2000; Lana et al., 2013). Entre os períodos Riáciano e Orosiriano ocorreram eventos orogénéticos entre o CSF e o Cráton do Congo, que ocasionaram a amalgamação de núcleos arqueanos e arcos de ilhas oceânicas e originaram o Cinturão Mineiro (Figura 1), que é formado por suítes de granitoides de composição tonalito-trondhjemitó-granodiorito, rochas plutônicas não deformadas como gabros, dioritos e granitos, além de vulcânicas e subvulcânicas (Teixeira et al., 2015).

O gnaiss migmatítico Itapecerica (Figura 1) foi formado pelo retrabalhamento crustal do Complexo Divinópolis e de sequências supracrustais paleoproterozoicas durante a Orogenia Riáciano-Orosiriana. Com idade de 2,04 Ga, o migmatito Kinawa (Carvalho et al., 2017) do Complexo Itapecerica é um exemplo de crosta retrabalhada, em que metagranodioritos de 2,7 Ga foram parcialmente fundidos na Zona de Cisalhamento Cláudio (ZCC) durante o Paleoproterozoico. Segundo Coelho & Chaves (2019), a ZCC tem orientação NE-SW, caráter dextral e guarda khondalitos (rochas metapelíticas de alto grau metamórfico com protólitos derivados de fundo oceânico) cujo metamorfismo atingiu um pico de 850–950 °C e 10–11 kbar. A ZCC representa a sutura formada há 2011 ± 20 Ma entre os Complexos Campo Belo/Bonfim e Divinópolis (Coelho & Chaves, 2019; Chaves et al., 2019).

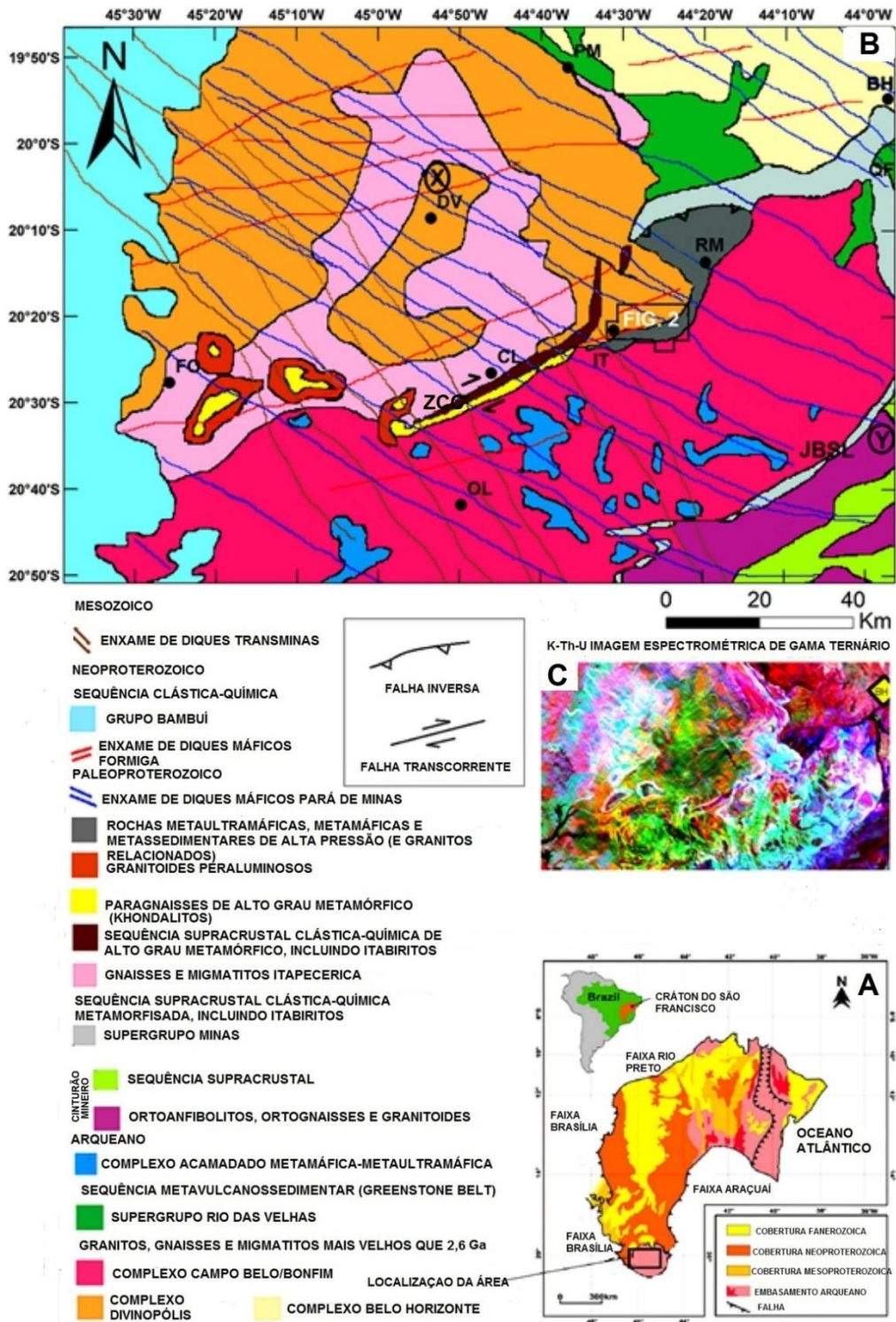


Figura 1-(A) O Crátón do São Francisco; (B) Mapa geológico do sul do Crátón do São Francisco (modificado de Chaves et al., 2019) QF- Quadrilátero Ferrífero; LJBS- Lineamento Jeceaba-Bom Sucesso; ZCC-Zona de cisalhamento Cláudio; Cidades: BH- Belo Horizonte, PM- Pará de Minas, DV- Divinópolis, RM-Rio Manso, IT-Itaguara, FO-Formiga, CL-Claúdio, OL-Oliveira, IP- Itapeçerica. (C) Imagem espectrométrica gama ternário K-Th-U do sul do Crátón do São Francisco (CPRM-CODEMIG, 2014).

Como um prolongamento da ZCC, a SI é uma sequência metamáfica-ultramáfica, composta por rochas metaperidotíticas e metagabróicas, rochas metassedimentares como formações ferríferas, metacherts, quartzitos e mica-xisto, além do Granito Córrego Peixoto. Essas litologias são encontradas em um cinturão estreito NE-SW (Figura 2). Segundo Chaves et al. (2019), os quartzitos e mica-xistos representam um prisma acrescionário que se desenvolveu no Paleoproterozoico em uma zona de paleo-subducção na SI. Esse prisma acrescionário foi envolvido em uma colisão entre os Complexos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim em ~2100-2050 Ma e seu pico metamórfico atingiu ~18 kbar e ~626 °C. Chaves & Porcher (2019) adicionalmente identificaram retroeclogitos na SI, os quais revelam idade de eclogitização de 2194 ± 55 Ma com pico metamórfico entre 17 e 20 kbar e ~ 600-700 °C ocorrido durante a referida colisão continental.

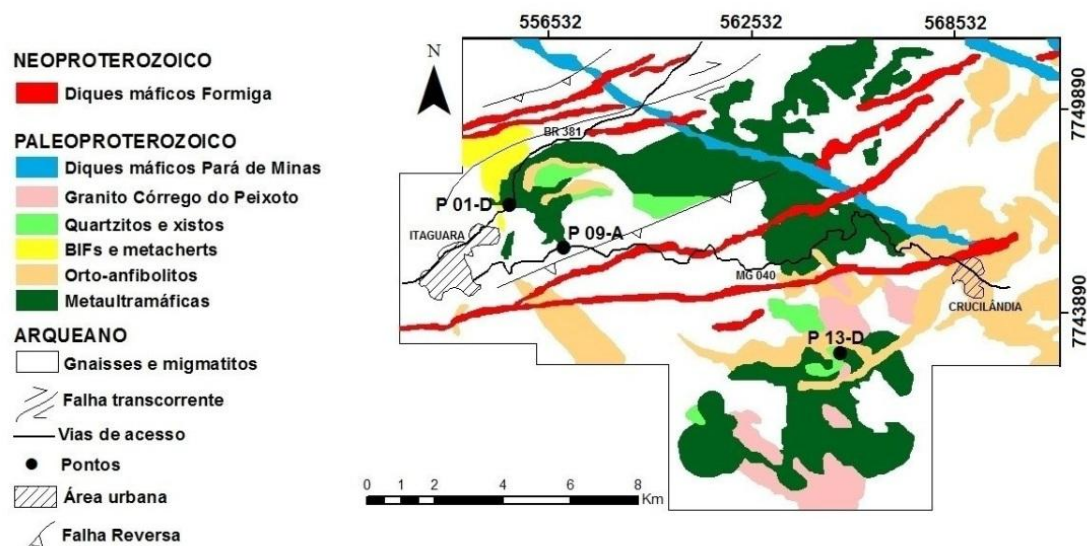


Figura 2 - Mapa geológico da Sequência de Itaguara, com a localização das amostras (P09-A, P01-D, P13-D) de rochas metaultramáficas com talco-olivina estudadas (Modificado de Goulart & Carneiro, 2008 e Chaves et al., 2019).

A localização das amostras de rochas metaultramáficas aqui investigadas entre as cidades de Itaguara e Crucilândia, onde são encontrados gnaisses, migmatitos, anfibolitos, quartzitos, mica-quartzo xistos, granitos e formações ferríferas bandadas, está apresentada na figura 2. Diferentes gerações de diques máficos paleo- e neoproterozoicos (Chaves, 2013) cortam a área.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC/UFMG) foram feitas seções delgadas das três amostras de rochas metaultramáficas localizadas na figura 2, que foram descritas microscopicamente em microscópio Olympus BX-41. As análises de litogeoquímica dessas amostras foram realizadas no laboratório da SGS Geosol. As amostras foram analisadas por ICP-OES (Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado) e ICP-MS (Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado). A perda ao fogo (LOI) foi obtida após aquecimento a 1000 °C, os limites de detecção para elementos maiores ficaram na ordem de 0,01%, para elementos traço entre 0,05 e 10,00 ppm, e elementos terras raras entre 0,05 e 0,10 ppm. Para o tratamento de dados geoquímicos foi utilizado o aplicativo Geoplot (Zhou & Li, 2006), como extensão no Microsoft Excel.

Foi usado o software Theriak-Domino (De Capitani & Petrakakis, 2010) para a obtenção da pseudoseção (diagrama pressão versus temperatura de equilíbrio de fases) no sistema CFMASHO (Ca-Fe-Mg-Al-Si-H-O), usando a análise química de rocha total da amostra P 09-A e o banco de dados td-6axNCKFMASHTOm45.txt, considerando todo fluido como H₂O.

As abreviações minerais usadas a seguir são de acordo com Whitney & Evans (2010), sendo elas: Cpx-Clinopiroxênio, Spl-Espinélio, Antigorita-Atg, Ol-Olivina, Tlc-Talco, Chl-Clorita, Tr-Tremolita, Opq- Minerais Opacos, Srp-Serpentina.

RESULTADOS

Petrografia

Os afloramentos das rochas metaultramáficas investigadas encontram-se em cortes de estrada, mostrando desde rochas com aspecto que lembra a rocha ígnea original (Figuras 3A, 3B e 3C) até litotipos com texturas bastante modificadas pelo metamorfismo (Figuras 3D e 3E).

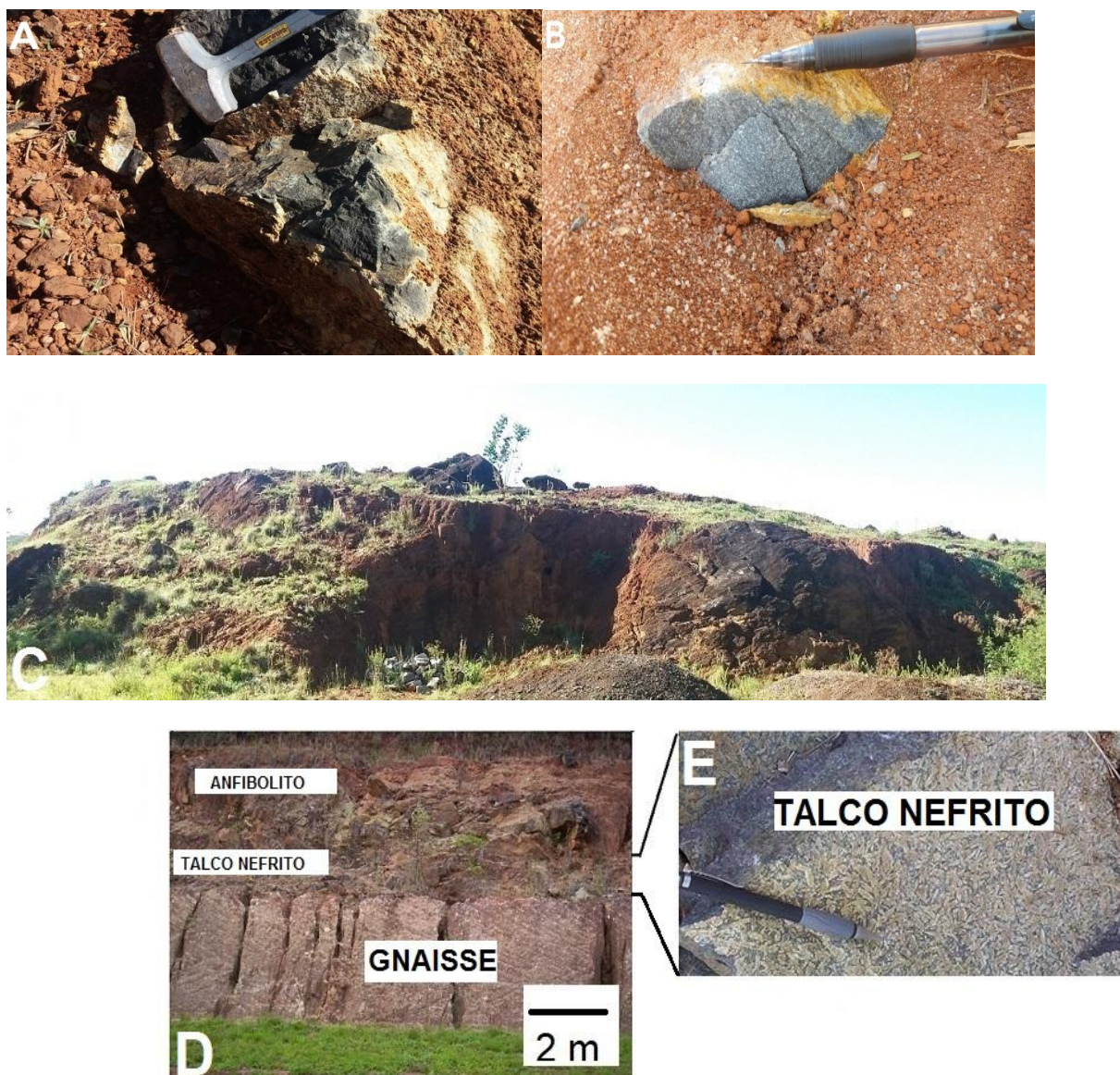


Figura 3- Fotografias de afloramentos das rochas metaultramáficas da Sequência Itaguara (A) Detalhe do ponto P 01-D; (B) Afloramento do ponto P13-D. Coordenadas: X-565164 e Y-7742710 (C) Vista geral de afloramento do ponto P 01-D. Coordenadas: X-555378 e Y-7747091 (D) Afloramento corte de estrada do ponto P 09-A com rocha gnáissica intemperizada sobreposta por rochas metaultramáficas talco nefrítico e rochas anfibolíticas. Coordenadas: X-556973 e Y-7745814 (E) Detalhe do talco nefrito analisado para este artigo (Chaves et al., 2019).

P 09-A

O talco nefrito do ponto P 09-A localiza-se no corte de estrada a leste da cidade de Itaguara, sobreposto a rochas gnáissicas migmatíticas (Figuras 3D e 3E). Apresenta textura inequigranular, de grãos grossos (Figura 3E), tendo na composição talco (40%), tremolita (~25%), clorita (~10%), serpentina (~10%), restos de espinélio (~5%), clinopiroxênio (~3%) e olivina (~5%) primárias, além de iddingsita como mineral secundário (Figuras 4A, 4B). Microscopicamente, o talco é incolor, de granulação grossa,

e a tremolita ocorre como cristais prismáticos também incolores, sem orientação definida, ambos por toda a rocha (Figura 4D). A clorita é incolor, com aspecto lamelar, de granulação fina a média. A serpentina com cor verde claro, granulação média, mostra contatos com olivinas e clinopiroxênio. A olivina se apresenta como grãos reliquias e ocorre alterada parcial ou totalmente para talco, serpentina e iddingsita. Com cor verde, o espinélio ocorre associado a minerais opacos (prováveis magnetitas – Figura 4 C).

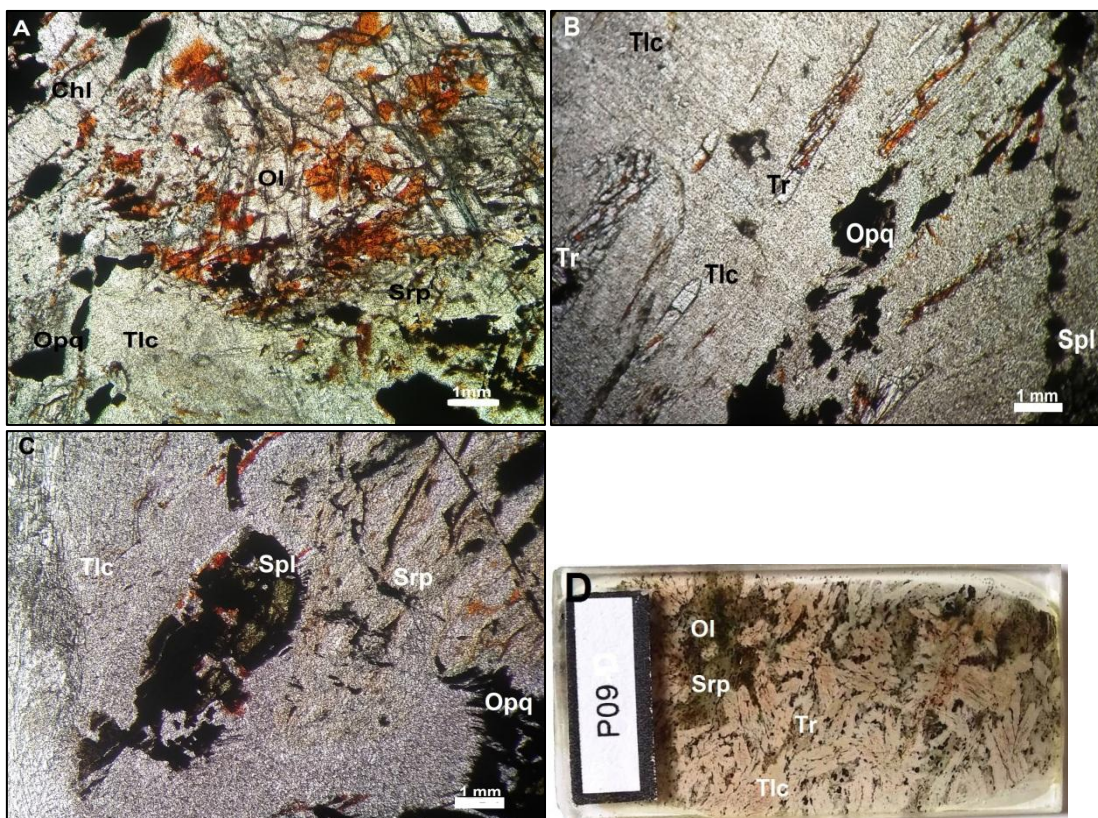


Figura 4 - Fotomicrografias da rocha metaultramáfica do ponto P 09-A da Sequência Itaguara sob polarizadores descruzados; A) Olivina primária sendo substituída por talco, serpentina e minerais opacos e por iddingsita secundária; B) Cristais prismáticos de tremolita disseminados entre talco, espinélio e opacos; C) Detalhe do espinélio verde associado a opacos. D) Fotografia da lâmina delgada do talco com tremolita.

P 13-D

A rocha metaultramáfica do ponto P 13-D está localizada a sudoeste da cidade de Crucilândia, adjacente às rochas ortoanfibolíticas, quartzitos e xistos (Figura 3B). A rocha de coloração verde escuro, de textura inequigranular, de grãos finos a médios é constituída por olivina (~30 %), clinopiroxênio (~15 %), espinélio (~10 %), talco (~20 %), serpentina (~15 %), clorita (5 %) e minerais opacos acessórios (Figura 5A). A olivina e o clinopiroxênio ocorrem em toda a rocha como grãos médios, alterando para serpentina, e

por vezes talco. O espinélio é esverdeado e está presente na rocha como grãos finos, fazendo contato com mineral opaco (possível magnetita). A serpentina apresenta coloração verde claro com grãos finos, substituindo a olivina através de fraturas e em suas bordas.

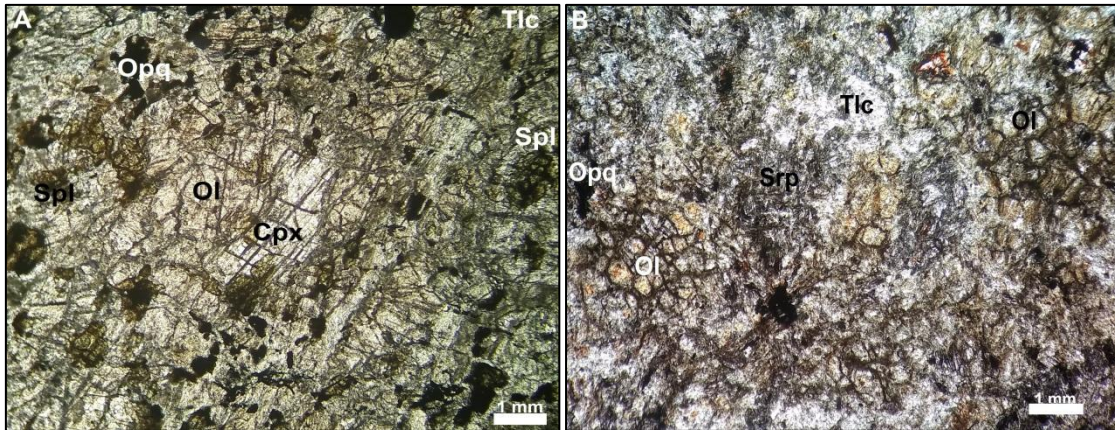


Figura 5- A) Fotomicrografia da metaultramáfica do ponto P 13-D sob polarizadores descruzados, com cristais de olivina, clinopiroxênio e espinélio entre talco e serpentina. B) Fotomicrografia da metaultramáfica do ponto P 01-D sob polarizadores descruzados. Olivina primária sendo substituída por talco, serpentina e minerais opacos.

P 01-D

O ponto P 01-D está localizado no corte de estrada a nordeste da cidade de Itaguara. As rochas metaultramáficas deste ponto encontram-se adjacentes a quartzitos, xistos, BIF's, metacherts, ortoanfíbolitos, gnaisses e migmatitos (Figura 3C). A rocha é de coloração verde escura, inequigranular de grãos finos. A composição mineralógica da rocha é representada por serpentina (~40 %), talco (~20 %), clorita (~15 %), olivina (~10 %), clinopiroxênio (~8 %) espinélio (~7 %) (Figura 5B). A serpentina é cinzenta, possui granulação fina, ocorre como agregados lamelares constituindo quase todo o volume da rocha, como alteração da olivina. O talco ocorre como cristais finos, junto com serpentinhas e olivinas. A clorita ocorre como cristais incolores, com grãos finos. O espinélio amarronzado ocorre disperso por toda a rocha, associado a mineral opaco.

Geoquímica

A composição química das amostras são apresentados na tabela 1. Os teores de SiO_2 variam entre 43,26 % a 46,25 %, os de MgO entre 26,50 % a 32,33 %, os de Cr_2O_3 entre 0,30 % e 0,48 % e os de Ni entre 1096 ppm e 2945 ppm, teores estes que corroboram a origem mantélica do protólito peridotítico. No Diagrama ternário Al_2O_3 - $(\text{FeO}+\text{TiO}_2)$ -

MgO de Jensen (1976) (Figura 7 A), verifica-se que as rochas analisadas plotam no campo dos komatiítos peridotíticos.

Tabela 1 - Composição química representativa das rochas metaultramáficas da Sequência de Itaguara (óxidos em % por peso, traços e terras raras em ppm). $Eu/Eu^* = EuN/\sqrt{(Sm \times Gd)N}$ (N - normalizada ao condrito).

Amostras	Elementos Maiores (%)														
	Limite de detecção 0,01%														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO _T	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total		
P 01-D	43,26	0,11	3,65	0,30	7,98	32,33	0,12	0,88	0,03	0,03	0,01	10,76	99,40		
P 09-A	46,25	0,17	5,85	0,39	7,94	29,78	0,13	2,51	0,24	0,07	0,02	7,28	100,63		
P 13-D	45,82	0,32	9,16	0,48	10,72	26,50	0,16	3,24	0,21	0,09	0,01	3,38	100,09		
Elementos traços (ppm)															
	Rb	Ba	Sr	Zr	Nb	Y	Ni	Co	Hf	Ta	Th	U	V	Cu	
Limite de detecção	0,20	10,00	10,00	10,00	0,05	0,05	5,00	0,50	0,05	0,05	0,10	0,05	5,00	5,00	
P 01-D	0,70	13,00	12,00	15,00	1,61	40,73	2945,00	104,60	0,24	0,05	0,40	0,10	0,00	8,00	
P 09-A	3,40	10,00	10,00	22,00	1,58	7,20	1342,00	71,70	0,58	0,12	0,50	0,22	203,00	36,00	
P 13-D	3,00	11,00	33,00	39,00	1,35	11,36	1096,00	104,20	0,84	0,05	1,00	0,22	112,00	5,00	
Elementos terras raras (ppm)															
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Limite de detecção	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05	
P 01-D	41,00	6,50	7,35	25,70	4,60	1,32	5,42	0,95	5,94	1,13	3,27	0,44	2,30	0,35	
P 09-A	17,20	4,60	0,55	2,10	0,50	0,10	0,73	0,11	0,84	0,20	0,61	0,07	0,60	0,08	
P 13-D	6,90	5,60	1,28	5,40	1,60	0,23	1,93	0,30	2,23	0,46	1,40	0,21	1,30	0,19	
(Eu/Eu)*	P 01-D			0,80			P 09-A			0,50			P 13-D		0,40

No diagrama Dy/Yb versus La/Yb, as amostras estudadas estão no campo mantélico de estabilidade do espinélio-peridotito (Figura 6B). No diagrama de elementos terras raras (ETR) normalizados ao condrito das rochas metaultramáficas da SI mostram anomalias negativas de Eu e Ce, e um enriquecimento de elementos terras raras leves (ETRL) em relação aos elementos terras raras pesados (ETRP) nas três amostras analisadas (Figura 7A). O diagrama multielementar normalizado ao manto primitivo mostra anomalias negativas de Ba, Nb, Ta, Ce, Sr, Eu e Ti (Figura 7B). Em ambos os diagramas, nota-se similaridade de padrões entre as metaultramáficas da SI e os serpentinitos paleoproterozoicos originados de peridotitos subductados do Cráton do Congo (Tsongui et al., 2019).

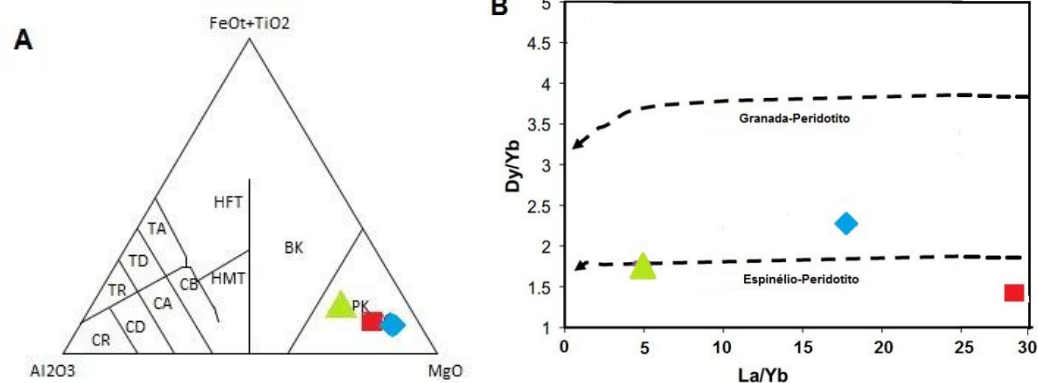


Figura 6 – Legenda: Azul ponto P 01-D; verde ponto P 09-A; Vermelho ponto P13-D. A) Diagrama de Jensen (1976), onde: PK- Komatiito Peridotítico, BK-Komatiito Basáltico, HFT- Basalto Toleítico de alto Fe, HMT- Basalto Toleítico de alto Mg, TA- Andesito Toleítico, CB- Basalto Cálcio-Alcalino, TD- Dacito Toleítico, CA- Andesito Cálcio-Alcalino, TR- Riodacito-riolito toleítico, CD- Dacito Cálcio-Alcalino, CR- Riodacito/ riolito cálcio-alcalino; B) Diagrama Dy/Yb versus La/Yb para as metaultramáficas SI mostrando sua geração em profundidades mais rasas do manto litosférico, no campo de estabilidade de espinélio-peridotito (Jung et al. 2006).

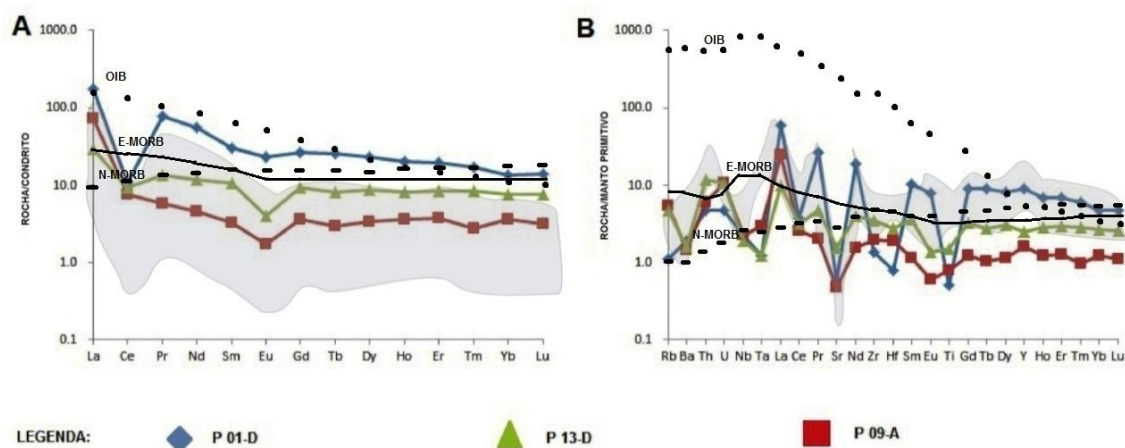


Figura 7- (A) Diagrama de elementos terras raras normalizados ao condrito de Sun & McDonough (1989); (B) Diagrama de elementos incompatíveis normalizados pelos valores do manto primitivo de Sun & McDonough (1989). Padrões de OIB (Basaltos de ilhas oceânicas), N-MORB (Basalto normal de cadeia meso-oceânica) e E-MORB (Basalto enriquecido de cadeia meso-oceânica (Sun & McDonough, 1989) são apresentados para comparação. A região cinza representa a composição de serpentinitos paleoproterozoicos originados de peridotitos subductados de Tsongui *et al.* (2019).

Termobarometria

Sob qualquer valor de pressão abaixo de 17 kbar e em temperaturas inferiores a 450-500° C, o sistema CFMASHO (Ca-Fe-Mg-Al-Si-H-O), da amostra P 09-A

apresentado na pseudoseção da figura 8 revela como assembleia mineral estável os minerais olivina, clorita, antigorita, espinélio, talco e tremolita. Nestas mesmas condições de pressão e em temperaturas superiores a 500-550 °C, antigorita não é estável e são estáveis olivina, tremolita, talco, espinélio, clorita e a presença de H₂O livre no sistema.

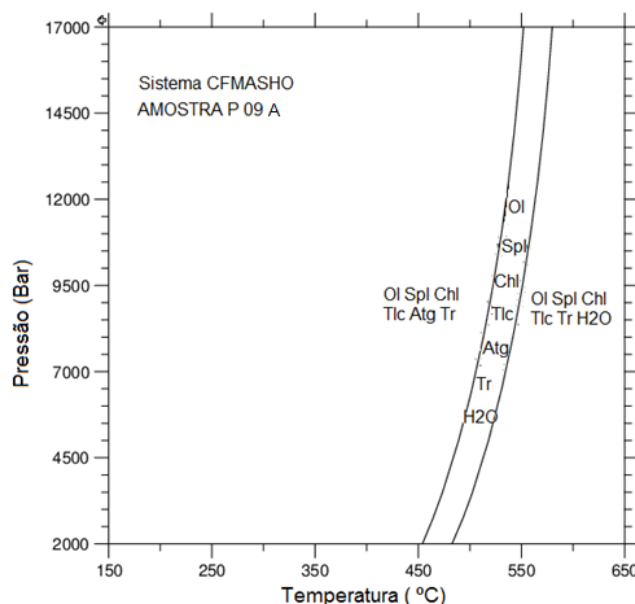


Figura 8- Pseudoseção da amostra P 09-A.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Quando as rochas metaultramáficas da SI são plotadas no diagrama ternário de Jensen (1976) (Figura 6A), as amostras situam-se no campo dos komatiítos peridotíticos, de origem mantélica. A presença de olivina e clinopiroxênio residuais associadas à espinélio nas amostras estudadas legitimam o protólito destas rochas como um espinélio wehrlito. No gráfico Dy/Yb versus La/Yb da figura 6 B nota-se que as amostras plotam próximas ao padrão Espinélio-Peridotito, possível litotipo do manto litosférico oceânico paleoproterozoico da SI, gerado a partir de um manto mais raso.

As rochas metaultramáficas da SI foram, provavelmente, hidrotermalizadas e metamorfizadas em vários graus, desde o metassomatismo abaixo do assoalho oceânico anterior à subducção até durante a própria subducção e posterior exumação tectônica. Seus minerais primários olivina, clinopiroxênio e espinélio estão parcialmente até quase completamente substituídos por serpentina, talco, tremolita e clorita. A obliteração de minerais anidros originais ocorre por processo de hidratação desses litotipos ultramáficos. A formação da serpentina, por exemplo, pode ser expressa pela reação: $Ol + SiO_{2aq} + H_2O$

= Atg.

Em dorsais meso-oceânicas, talco pode surgir da substituição de serpentina hidrotermal, a qual é considerada por Boschi et al. (2006) como uma reação que ocorre na presença de fluidos ricos em SiO₂ e temperaturas de 300-350 °C. Essa substituição de serpentina por talco consiste em um processo metassomático, de acordo com a seguinte reação: $Srp + 2SiO_2 = Tlc + H_2O$.

A tremolita aparece a partir da substituição do clinopiroxênio devido à sua hidratação nos processos metamórficos progressivos (Kodolányi et al., 2011), possivelmente associados à processos de subducção da litosfera oceânica sob fácies anfíbolito de grau baixo. Pode ser o resultado da seguinte reação, que também promove o aparecimento de serpentina: $Cpx + H_2O = Tr + Srp$.

A clorita pode ter sido formada com a entrada adicional de água no sistema, também alterando minerais anidros do protólito, segundo a reação: $Ol + Cpx + Spl + H_2O = Mg-Chl$.

Após o metamorfismo progressivo e regressivo a que se submeteram essas rochas, é possível também admitir a possibilidade de que a serpentina que aparece nas amostras analisadas seja fruto da reação retrometamórfica: $Tlc + Ol + H_2O = Atg$.

De acordo com a pseudoseção da figura 8, percebe-se nas rochas metaultramáficas da SI que a serpentinização ocorreu em temperaturas inferiores a 500 °C, sem ser possível estimar a pressão seja do pico metamórfico ou do próprio retrometamorfismo.

Os diagramas ETR e multielementar apresentam padrão similar aos serpentinitos paleoproterozoicos associados à subducção de litosfera oceânica da série de Nyong em Camarões (Tsongui et al., 2019), no Cráton do Congo setentrional (Figura 7), e também possuem padrão similar a rochas metamáficas de assinatura E-MORB de fácies anfíbolito superior da SI abordadas por Barbosa & Chaves (no prelo) as quais estão associadas em campo (figura 3C). Esta figura sugere que as rochas metamáficas e metaultramáficas estão lançadas por sobre o embasamento gnáissico, possivelmente devido a processos de exumação tectônica durante estágio colisional paleoproterozoico (Chaves et al., 2019). As anomalias negativas de Ce e Eu estão associadas a interações hidrotermais causadas por águas do assoalho oceânico (Figura 7A) (D’Orazio et al., 2004), provavelmente na fase pré-subducção.

No processo de subducção, as rochas foram submetidas ao aumento de temperatura e principalmente de pressão, proporcionando a desvolatilização das rochas, liberando fluidos contendo por Nb, Ta, Ti, Ba e Sr (Liang et al., 2009) e ocasionando anomalias

negativas desses elementos (Figura 7B), nas rochas residuais ou não. Particularmente, a anomalia negativa de Nb suporta o ambiente tectônico relacionado à subducção. Adicionalmente, no diagrama Yb-U de peridotitos serpentinizados (Figura 9A), as amostras estudadas plotam no campo dos serpentinitos subductados. E no diagrama La-Nb (Figura 9B) as amostras mostram um *trend* que revela interação fluido-rocha que pode ter ocorrido ainda na fase pré-subducção a partir do hidrotermalismo de fundo oceânico, na fase de subducção ou ambas.

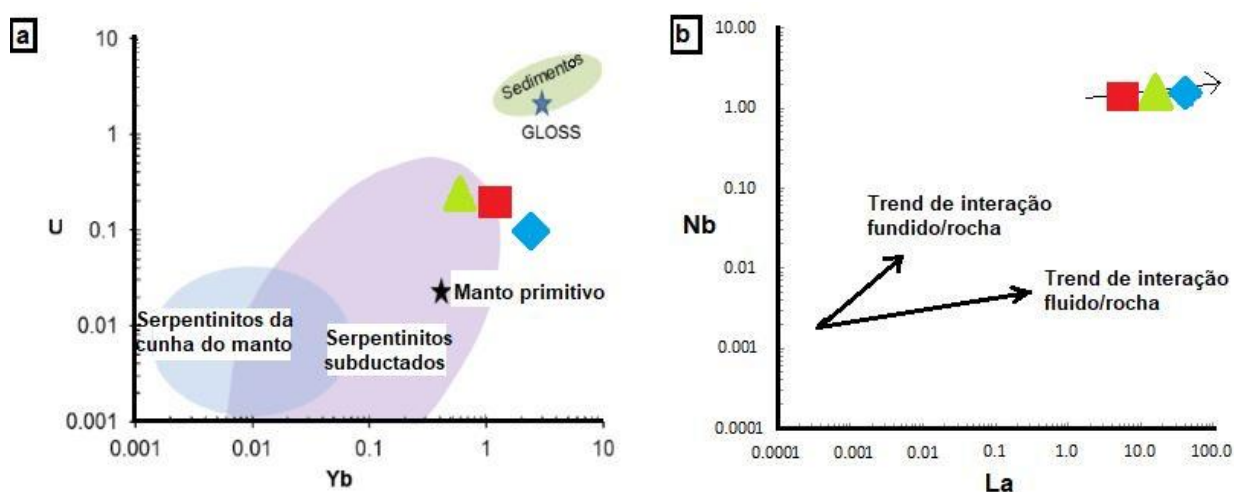


Figura 9- Legenda: Azul ponto P 01-D; verde ponto P 09-A; Vermelho ponto P 13-D. A) Diagrama Yb-U de peridotitos serpentinizados (Tsongui et al., 2019). Composições do manto primitivo, sedimentos subductantes globais (GLOSS) e sedimentos são respectivamente de McDonough & Sun (1995), Plank & Langmuir (1998) e Li & Schoonmaker (2003). B) Diagrama La-Nb (Tsongui et al., 2019). Trends de interações fundido/rocha e fluido/rocha de peridotitos mantélicos estão apresentados (Paulick et al., 2006).

A figura 10 ilustra o desenvolvimento de subducção e posterior formação de zona de sutura que ocorreu entre os Complexos Divinópolis e Bonfim/Campo Belo no Paleoproterozoico. Inicialmente, num regime divergente, foi gerada uma bacia oceânica acompanhada pela deposição de sedimentos siliciclásticos e químicos (Figura 10A). As rochas ultramáficas foram afetadas por fluidos do fundo oceânico, hidratando/alterando seus minerais originais. Um processo de convergência interrompeu a evolução da bacia, cujas rochas foram sendo subductadas (Figura 10B) e submetidas a regime metamórfico progressivo. Por fim, as rochas que ora faziam parte de um fundo oceânico foram posicionados num orógeno colisional (Figura 10C) durante o processo de exumação tectônica, quando elas passaram por reações retrometamórficas.

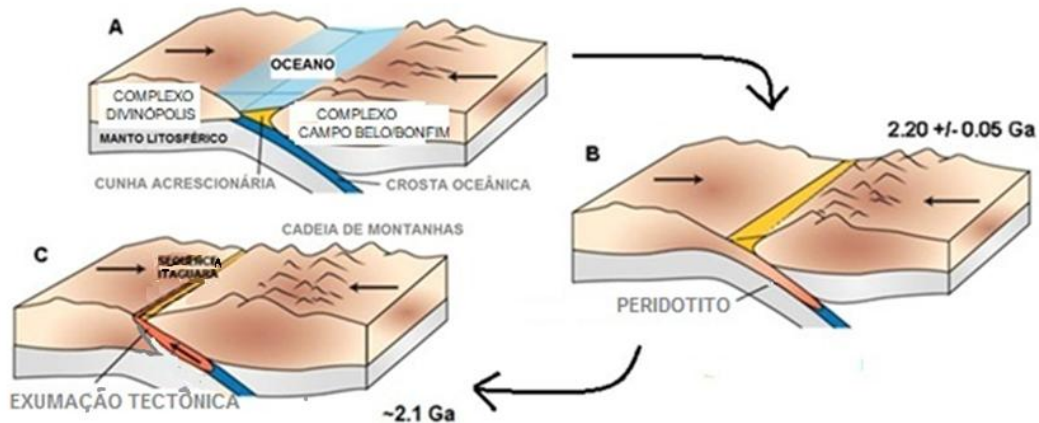


Figura 10- A, B, C- Evolução geológica da região de Itaguara em ~2200-2100 Ma durante a subducção da litosfera oceânica com assinatura E-MORB, seguida pela colisão entre os Complexos Divinópolis e Campo Belo/Bonfim no sul do Cráton do São Francisco (adaptado de Chaves & Porcher, 2020), ao longo da seção X-Y da figura 1.

Evolução geológica similar no sul do CSF é verificada por Miranda & Chaves (2021), os quais descreveram, na região de Itapeçerica (MG), rochas metamáfica-metaultramáficas com assinatura E-MORB que estariam associadas a essa colisão continental paleoproterozoica, que teria ocasionado à exumação de parte da crosta oceânica. Adicionalmente, Chaves & Porcher (2020) encontraram retroeclogito na SI com 2194 ± 55 Ma com pico metamórfico perto de 16 kbar e 600 °C. Estudos feitos por Chaves et al. (2019) e Chaves & Porcher (2020) apontam que o grupo de rochas que compõe a SI possuem gênese parecida, retratando evento de subducção seguido pela colisão continental ocorrida durante o Paleoproterozoico.

Na reconstrução do supercontinente Columbia (Nuna) de Chaves (2020) mostrada na figura 11, é possível visualizar os orógenos colisionais Transamazônico e Eburneano de 1,95-2,10 Ga, dentro dos quais as rochas metaultramáficas da SI e os serpentinitos da série de Nyong em Camarões (Tsongui et al., 2019), estão respectivamente posicionadas e são geoquimicamente similares (Figura 7A e 7B). Todas elas são rochas derivadas de espinélio peridotito do manto litosférico oceânico metamorfisadas em zonas de sutura paleoproterozoicas guardadas nos crátons do Congo e do São Francisco, que correspondiam a um único cráton no Paleoproterozoico.

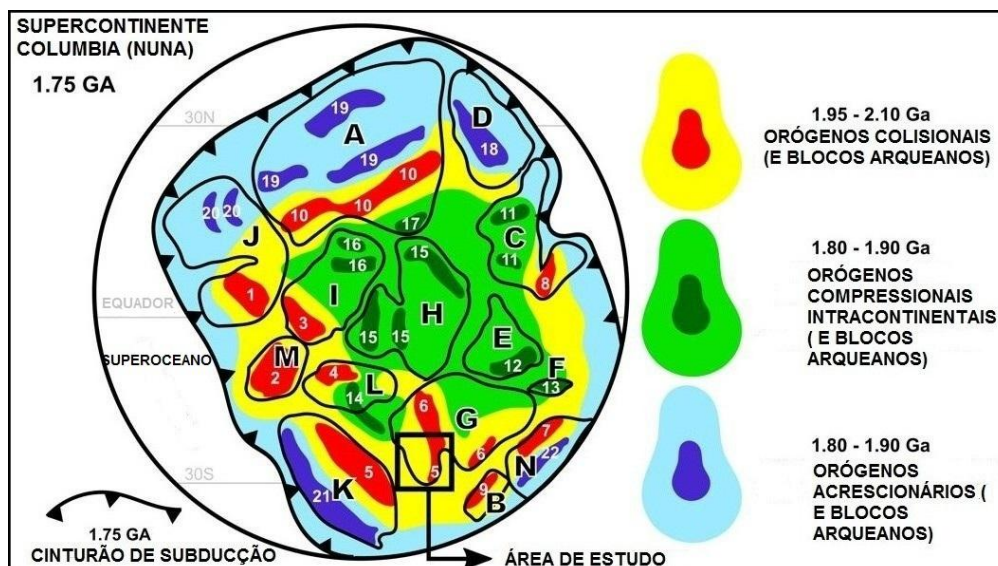


Figura 11- Distribuição de orógenos colisionais (1.95-2.10 Ga), intracontinentais e compressoriais (1.80-1.90 Ga) concêntricos e blocos Arqueanos indiscriminados na reconstrução do Columbia (Nuna) há 1.75 Ga (Chaves, 2021). O quadrado preto marca a localização da SI. A – Laurentia; B – Kalahari; C – Austrália; D – Mawson/Leste da Antártica; E – Índia; F – Tarim; G – São Francisco/Congo; H – Sibéria; I – África Ocidental; J – Báltica; K - Amazônia; L – Norte da China; M – Rio de La Plata; N – Tanzânia; 1 – Volga-Don/Báltica; 2 – Tandilia-Piedra Alta/Rio de la Plata; 3 – Birimiano/África Ocidental; 4 – Cinturão Khondalítico/Norte da China; 5 – Transamazônica/ Cráton Amazônico e São Francisco; 6 – Eburneano e Luiziano/ Cráton do Congo; 7 – Usagarano/Tanzânia; 8 – Glenburg/Austrália Ocidental; 9 – Limpopo/Kalahari; 10 – Taltson-Thelon e Inglefield/Laurentia; 11 – Mount Isa e Halls Creek/Norte da Austrália; 12 – Himalaia Inferior/Índia; 13 – Tarim/Tarim; 14 – Transnorte da China/Norte da China; 15 – Angara, Akitkan, e Sutam/Sibéria; 16 – Zenaga e Reguibat/África Ocidental; 17 – Wopmay/Laurentia; 18 – Nimrod-Ross/Leste da Antártica; 19 – Trans Hudson, Torngat-Quebec, e Nagssugtoqidianiano/Laurentia; 20 – Lapland e Svecofenniano/Báltica; 21 – Rio Negro-Juruena/Amazônia; 22 – Ubendiano/Tanzânia.

Em suma, considerando as relações texturais mineralógicas, temperaturas calculadas e a geoquímica pode-se afirmar que as rochas metaultramáficas da região investigada tinham como protólito um espinélio wehrlito, que provavelmente fazia parte do manto litosférico oceânico, que pôde ter tido a influência de fluidos no assoalho oceânico, como também no metamorfismo dinâmico progressivo e regressivo gerado durante a subducção e posterior exumação relacionada à colisão continental paleoproterozoica local. Este trabalho reforça a ideia de que processos da moderna tectônica de placas já eram operantes no Paleoproterozoico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do Instituto de Geociências (IGC-UFMG), do CPMTC e do curso de pós-graduação. A primeira autora agradece a bolsa para pesquisa da CAPES. O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, A.S. & CHAVES, A.O. Anfibolitos Itaguara com assinatura E-MORB: prováveis integrantes de ofiolitos paleoproterozoicos do sul do Cráton do São Francisco. **Revista Geociências** (no prelo).
- BOSCHI, C.; FRUH-GREEN, G. L.; ESCARTIN, J. Occurrence and significance of serpentinite-hosted, talc and amphibole-rich fault rocks in modern oceanic settings and ophiolite complexes: an overview. **Ofioliti**, v.31, n.2, p.129-140, 2006.
- BUCHER, K. & GRAPES, R. **Petrogenesis of metamorphic rocks**. Springer Science & Business Media, p. 441, 2011.
- CARVALHO, B.B.; JANASI, V.A.; SAWYER, E.W. Evidence for Paleoproterozoic anatexis and crustal reworking of Archean crust in the São Francisco Craton, Brazil: a 23 dating and isotopic study of the Kinawa migmatite. **Precambrian Research**, v. 291, p. 98-118, 2017.
- CHAVES, A.O. Enxames de diques máficos de Minas Gerais- O estado da arte. **Geonomos**, v. 21, n.1, 2013.
- CHAVES, A.O. Columbia (Nuna) supercontinent with external subduction girdle and concentric accretionary, collisional and intracontinental orogens permeated by large igneous provinces and rifts. **Precambrian Research**, v. 352, p.106017, 2021.
- CHAVES, A.O.; GOULART, L.E.A.; COELHO, R.M.; MIRANDA, D.A., ARANDA, R.O.; RAMOS, S.L.L.M. High-pressure eclogite facies metamorphism and decompression melting recorded in paleoproterozoic accretionary wedge adjacent to probable ophiolite from Itaguara (southern São Francisco craton-Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v.94, 2019.
- CHAVES, A.O. & PORCHER, C.C. Petrology, geochemistry and Sm-Nd systematics of the Paleoproterozoic Itaguara retroeclogite from São Francisco/Congo Craton: one of the oldest records of the modern-style plate tectonics. **Gondwana Research**, v.87, p.224-237, 2020.
- COELHO, R. M. & CHAVES, A.O. Pressure-temperature-time path of Paleoproterozoic khodalites from Claudio shear zone (shouter São Francisco craton-Brazil): Links with khodalite belt of the Norte China cráton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 94, p.102-250, 2019.
- CPRM – Brazilian Geological Survey and CODEMIG - **Companhia de Desenvolvimento**

- Econômico de Minas Gerais.** Geological map of the Minas Gerais State [Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais], Escala 1:1000000 DVD-rom, 2014.
- DE CAPITANI, C. & PETRAKAKIS, K. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak-Domino software: **American Mineralogist**, v. 95, p.1006-1016, 2010.
- DILEK, Y. & ROBISON, P. T. Ophiolites in Earth history: introduction. **Geological Society London Special Publications**, v. 218, p.1-8, 2003.
- D'ORAZIO, M.; BOSCHI, C.; BRUNELLI, D. Talc rich hydrothermal rocks from the St. Paul and Conrad fracture zones in the Atlantic Ocean. **European Journal Mineralogy**, v. 16, p.73-83, 2004.
- FURNES, H.; DILEK, Y.; WIT, M. Precambrian greenstone sequences represent different ophiolite types, **Gondwana Research**, 2013.
- GOULART, L.E.A. & CARNEIRO, M.A. Magmatismo máfico-ultramáfico Paleoproterozoico no cráton São Francisco meridional: a sequência acamadada Itaguara. In: 45° CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2010 Belém. **Anais...** Sociedade Brasileira de Geologia, 2010.
- GOULART, L.E.A. & CARNEIRO, M.A. General characteristics and lithogeochemistry of the Itaguara layered (ultramafic-mafic) sequence, southern São Francisco Craton. **Geochimica Brasiliensis** v. 22, p. 045–072, 2008.
- JENSEN, L.S. A new cation plot for classifying subalkaline volcanic rocks. **Ontario Division Mines Miscellaneous Paper**, v. 66, p. 22, 1976.
- JUNG, C.; JUNG, S; HOFFER, E.; BERNDT, J. Petrogenesis of Tertiary mafic alkaline magmas in the Hoheifel Germany. **Journal of Petrology**, v. 47, n.8, p.1637-1671, 2006.
- KODOLÁNYI, J; PETTKE, T.; SPLANDER C.; KAMBER, B.S.; GMÉLING, K. Geochemistry of ocean floor and fore-arc serpentinites: constraints on the ultramafic input to subduction zones. **Journal of Petrology**, v. 53, n.2, p.235-270, 2011.
- LANA, C.; ALKIMIN, F.F.; ARMSTRONG, R.; SHOLZ, R., ROMANO, R.; NALINI Jr., H.A. The ancestry and magmatic evolution of Archean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. **Precambrian Research**, v. 231, p. 157-173, 2013.
- LI, Y.H. & SCHOONMAKER, J. Chemical composition and mineralogy of marine sediments. treatise on geochemistry, vol.7: sediments, diagenesis, and sedimentary rocks. In: Mackenzie FT (ed) Treatise on Geochemistry. **Elsevier**, Amsterdam, p. 1–35, 2003.
- LIANG, J.L.; DING, X.; SUN, X.M.; ZHANG, Z.M.; ZHANG, H.; SUN, W.D. Nb/Ta

- fractionation observed in eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling Project. **Chemical Geology**, v. 268, p. 27–40, 2009.
- MACHADO, N.; NOCE, C.M.; LADEIRA, E.A.; BELO DE OLIVEIRA, O.A. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero Southern São Francisco craton, Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v. 104, p. 12221-12227, 1992.
- McDONOUGH, W.F. & SUN, S.S. The composition of the Earth. **Chemical Geology**, v.120, p. 223–253, 1995.
- MIRANDA, D.A. & CHAVES, A.O. Itapeçerica metamafic-ultramafic rocks with E-MORB signature: ophiolitic remnants of the rhyacian-orosirian orogeny in southern São Francisco craton? **Geociências**, v. 40, n.1, p.1-12, 2021.
- OLIVEIRA, A.H. & CARNEIRO, M.A. Complexo Metamórfico de Campo Belo: Evolução Tectônica de uma crosta siálica arqueana do sul do Cráton do São Francisco, Minas Gerais (Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.73, n.3, 2001.
- PAULICK, H.; BACH, W.; GODARD, M.; DE H.J.C.M.; SURIR, G. ; HARVEY, J. Geochemistry of abyssal peridotites (Mid-Atlantic Ridge, 15 200N, ODP Leg 209): implication for fluid/rock interaction in slow spreading environments. **Chemical Geology**, v. 234, p.179–210, 2006.
- PLANK, T. & LANGMUIR, C.H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. **Chemical Geology**, v.145, p. 325–394, 1998.
- SUN, S.S. & McDONOUGH, W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts, implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., (Ed.). *Magmatism in the ocean basins*. **Geological Society of London**, London, v. 42, p.313-34, 1989.
- TEIXEIRA, W.; ÁVILA, C. A.; DUSSIN I, A.; CORREA NETO, A.V.; BONGIOLO, E. M.; SANTOS J. O. S.; BARBOSA N. S.. A juvenile accretion episode (2.35-2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. **Precambrian Research**, v. 256, p. 158-169, 2015.
- TEIXEIRA, W.; SABATE, P.; BARBOSA, J.; NOCE, C.M.; CARNEIRO, M.A. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: Cordani, Milani, Thomaz Filho & Campos (Ed.). *Tectonic Evolution of South America*. In: 31st INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 2000. Rio de Janeiro. **Anais...**p. 101-137, 2000.
- TSOUNGUI, P.N.E.; GANNO, S.; NJIOSSEU, E.L.T., MBONGUE, J.L.N.; WOGUIA,

- B.K.; TAMEHE, L.S.; WAMBO, J.D.T.; NZENTI, J.P. Geochemical constraints on the origin and tectonic setting of the serpentinized peridotites from the paleoproterozoic Nyong series, Eseka area, SW Cameroon. **Acta Geochimica**, v. 39, p. 404–422, 2019.
- WHITNEY, D.L. & EVANS, B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. **American Mineralogist**, v. 95, n.1, 185-187 p., 2010.
- ZHOU, J. & LI, X. 2006 Geoplot: an excel VBA program for geochemical data plotting. **Computers and Geosciences**, v. 32, p. 554-560, 2006.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As rochas metamáficas da SI apresentaram assinatura E-MORB, compostas mineralogicamente por hornblenda, plagioclásio, quartzo, clinopiroxênio e ortopiroxênio, tendo gabro como protólito. A presença de ortopiroxênio em sua mineralogia revela que esses litotipos atingiram a fácies granulito, fácies esta atingida também na zona de cisalhamento Cláudio, onde Coelho & Chaves (2019) encontraram khondalitos com temperatura e pressão de pico metamórfico de 900-950 °C e 10-11 kbar durante a colisão continental que ocorreu no paleoproterozoico, nas imediações de Itaguara. Em seguida, as rochas metamáficas da SI sofreram exumação tectônica e retrometamorfismo em fácies anfibolito, dada a abundância de hornblenda e plagioclásio. As rochas metaultramáficas da SI ocorrem em variados graus de metamorfismo e hidratação, com amostras que possuem mineralogia do protólito espinélio wehrlito praticamente obliteradas, enquanto outras preservam suas feições originais. Os cristais de olivina, espinélio e clinopiroxênio são da rocha protólito, e quando submetida a metamorfismo com influência de fluidos, estes minerais foram substituídos por serpentina, clorita, talco e tremolita.

Em campo, foi encontrada a textura similar à *Jackstraw* nas rochas metaultramáficas do ponto 09-A. *Jackstraw* é uma textura metamórfica, na qual placas alongadas de olivina estão associadas a talco, sendo originada da recristalização em estado sólido de olivinas e outros minerais (Figura 2) (IBGE, 1999). No Brasil, a textura *Jackstraw* tem sido relatada por Hartmann et al. (1987) e Massuda et al. (2020) em rochas metaultramáficas de ofiolitos do Complexo Bossoroca, do Rio Grande do Sul. Na literatura, comumente esta textura é confundida com a textura *Spinifex*. No entanto, as origens dessas texturas são distintas, sendo *Spinifex* gerada a partir de derrames de lavas com composição peridotítica com rápido resfriamento, gerando o komatiíto, caracterizada pelo desenvolvimento de olivinas e clinopiroxênios que assumem hábito esquelético altamente alongado, e os cristais podem ser dispostos em orientações dendríticas, ramificados ou paralelos (Evans & Trommsdorff, 1984).

Segundo Evans & Trommsdorff (1974), a olivina metamórfica com textura *Jackstraw* é forsterítica e se desenvolve em fácies anfibolito ou hornblenda hornfels numa associação olivina+talco encontrada em corpos ultramáficos serpentinizados, formados em temperaturas entre 500-600 °C (Snoke & Calk, 1978). Olivinas em textura *spinifex* possuem um zoneamento composicional com um núcleo mais magnésiano e forsterítico e as bordas faialíticas, mais ricas em ferro (Hartmann et al., 1987). Uma diferença que pode ser observada entre a olivina metamórfica para a olivina com textura *spinifex* é a presença de bordas retas,

que podem estar intercrescidas poiquiloblasticamente, não apresentando esqueletiformes (Hartmann et al., 1987). As rochas metaultramáficas da SI são rochas com protólitos plutônicos, ou seja, não há a geração de textura *spinifex* no contexto geológico sob o qual estas rochas se formaram.



Figura 2- Textura *Jackstraw* numa rocha Talco-Olivina (Snoke & Calk, 1978).

Pinheiro & Nilson (2000) foram os primeiros a descrever a ocorrência da textura sugerida por eles como *spinifex* de rochas metaultramáficas da região de Rio Manso-MG, adjacente à área da Sequência de Itaguara aqui investigada, porém relatando ora a presença da textura e ora sem ela, e também citam uma possível textura *pseudospinifex*, por não haver olivina primária esquelética preservada em região com intenso metamorfismo. Guice et al. (2022), voltam a descrever localmente as texturas em rochas metaultramáficas da região de Rio Manso como *spinifex*, ou seja ígneas, mas diante do metamorfismo local que levou ao crescimento granoblástico de assembleia mineral metamórfica contendo talco, anfibólio, clorita e serpentina, é pouco provável que se trate da preservação de uma textura ígnea, tendo em vista ser esta uma assembleia metamórfica.

No diagrama AFM (Figura 3) de Irvine & Baragar (1971), as amostras da área de pesquisa de metaultramáficas possuem um teor alto de MgO, tendo seu posicionamento em campos de peridotitos ofiolíticos metamórficos (Coleman, 1977). Tendo os anfibólitos da SI uma assinatura E-MORB e as metaultramáficas da SI esse caráter ofiolítico, além de sua correspondência em campo, ambas parecem estar atreladas à porção basal de uma sequência

ofiolítica, possivelmente associada a processos de subducção anteriormente à colisão continental seguida durante o paleoproterozoico. Nos diagramas Harker de variação para elementos maiores (Figura 5) e traços (Figura 4) foi utilizado MgO como índice de diferenciação, sendo que nos diagramas binários para elementos-traço foram usados Ni, Zr, Hf e Ga. Em todos eles observa-se uma correlação entre as rochas metamáficas e metaultramáficas, sugestiva de cogeneticidade.

As rochas metamáficas e metaultramáficas da SI caracterizam litotipos que fariam parte da estratigrafia de litosfera oceânica (Figura 6), o que reconfigura o contexto geológico da região. Portanto, essas rochas estão atreladas a processos de subducção de crosta oceânica, tendo sido exumadas em evento orogenético colisional paleoproterozoico entre os Complexos Campo Belo/Bonfim e Divinópolis que ocorreu durante a configuração do supercontinente Columbia (Nuna) (Chaves, 2021).

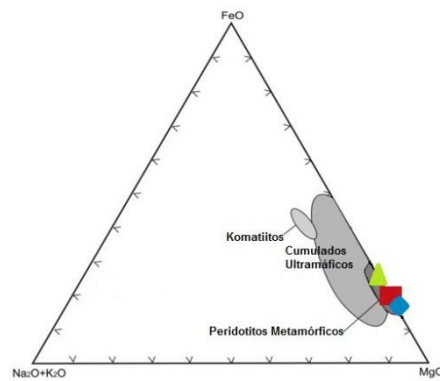


Figura 3- Diagrama ternário AFM (Na₂O+K₂O)-FeO-MgO das metaultramáficas Itaguara. Campos de máfica cumalados, cumalados ultramáficos e peridotitos metamórficos de Coleman (1977). Legenda: Azul ponto P 01-D; verde ponto P 09-A; Vermelho ponto P 13-D.

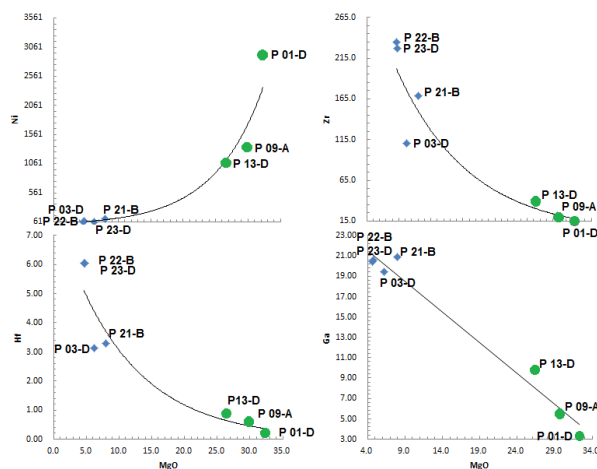


Figura 4- Diagramas Harker para elementos traços versus MgO. Amostras de rochas metaultramáficas são as de maior teor de MgO representado por círculos verdes e as de anfibolitos são de menor teor de MgO representado por losangos azuis.

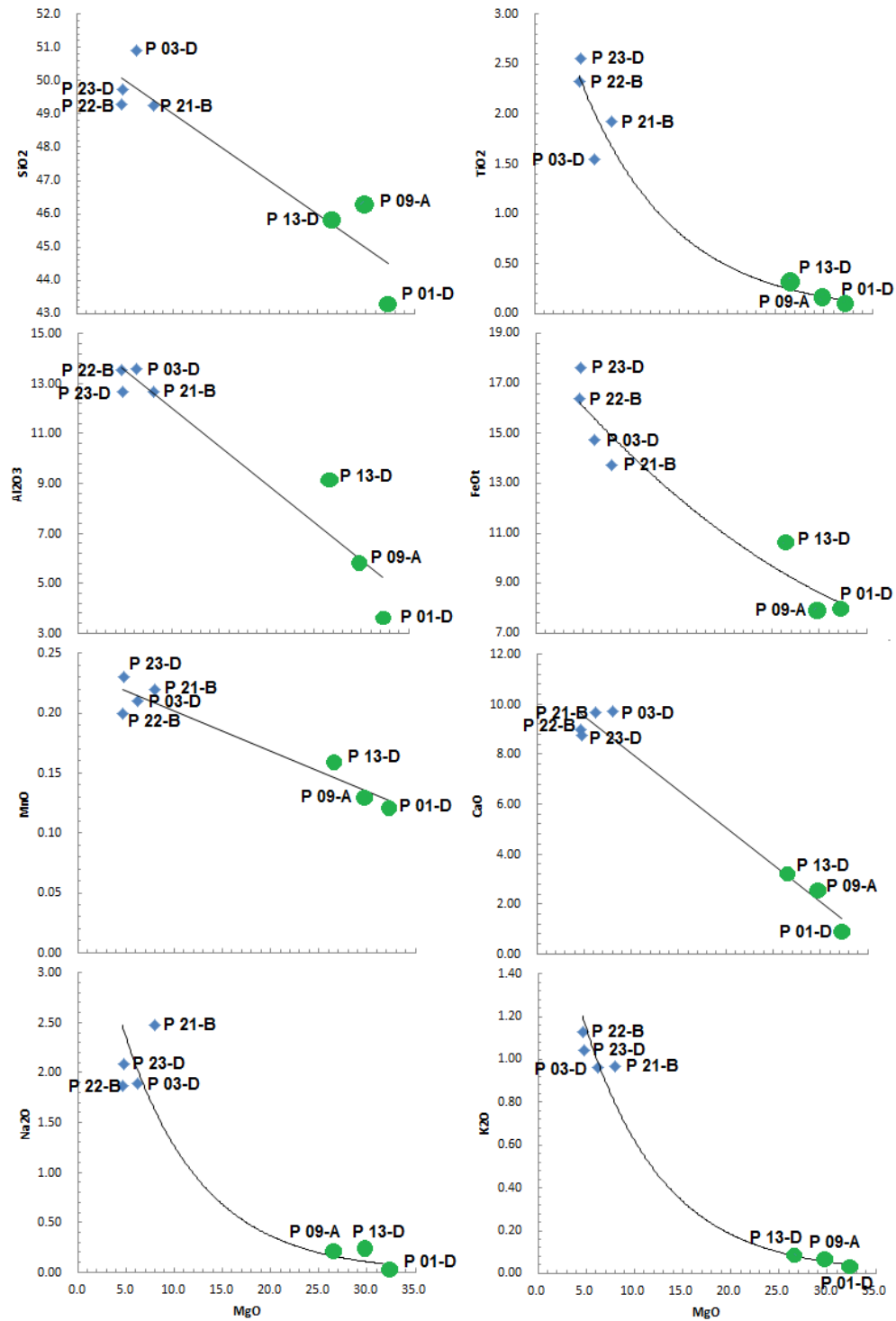


Figura 5- Diagramas Harker de elementos maiores versus MgO. Amostras de rochas metaultramáficas são as de maior teor de MgO representado por círculos verde e as de anfibolitos são de menor teor de MgO representados por losangos azuis.

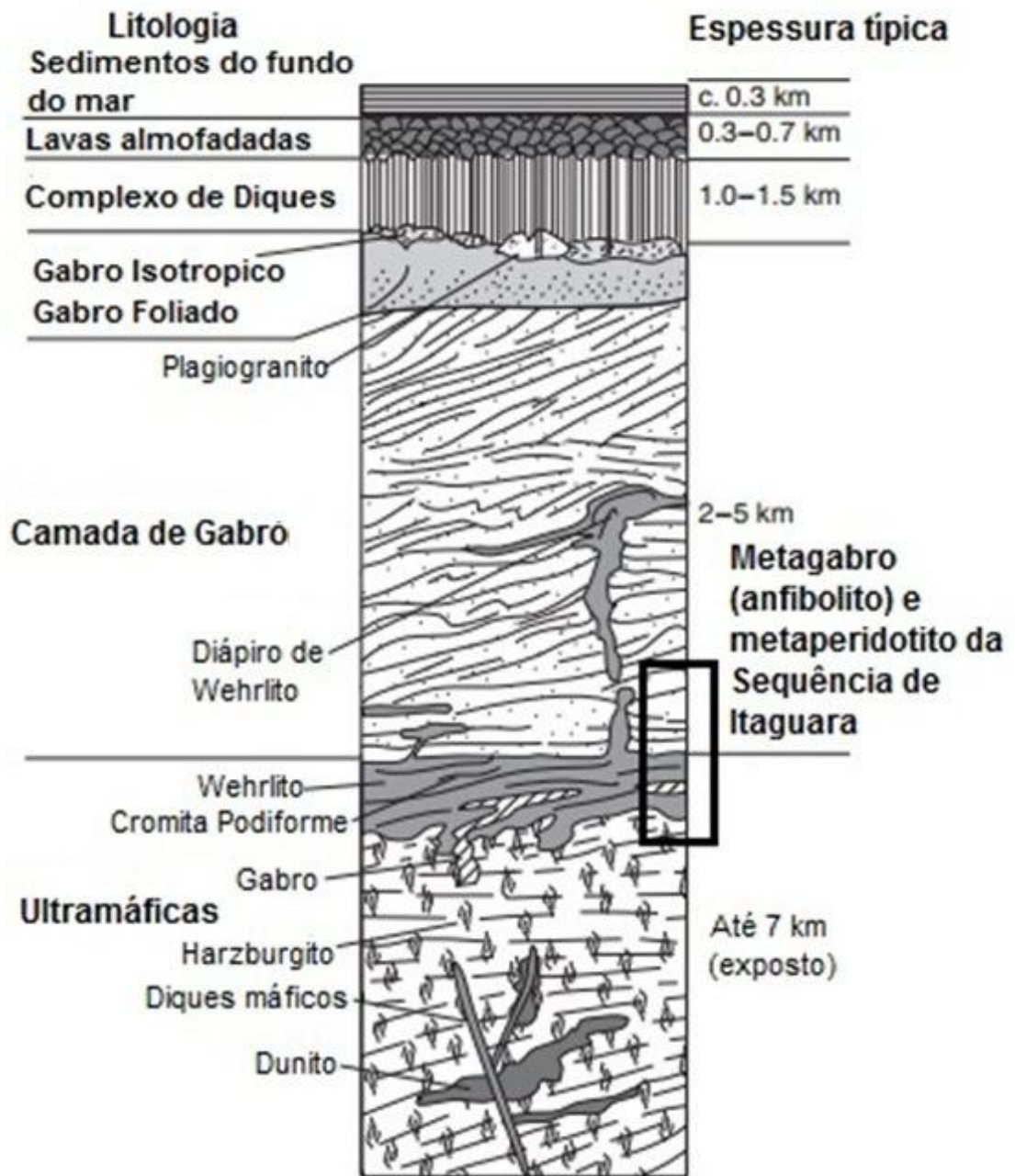


Figura 6- Sequência estratigráfica de um ofiolito (Winter, 2014).

Comparando os anfíbolitos de Itapeçerica de Miranda & Chaves (2021) com os anfíbolitos da SI observa-se que no diagrama V vs $Ti/1000$ (Shervais, 1982) (Figura 7A e B) ambos plotam no campo do MORB-basaltos da dorsal meso-oceânica. No Diagrama binário Y/Nb vs Zr/Nb (Xia & Li, 2019) (Figura 8 A e B), as rochas anfíbolíticas de Itapeçerica e as da Sequência de Itaguara caem na região de E-MORB-basaltos enriquecidos da dorsal meso-oceânica.

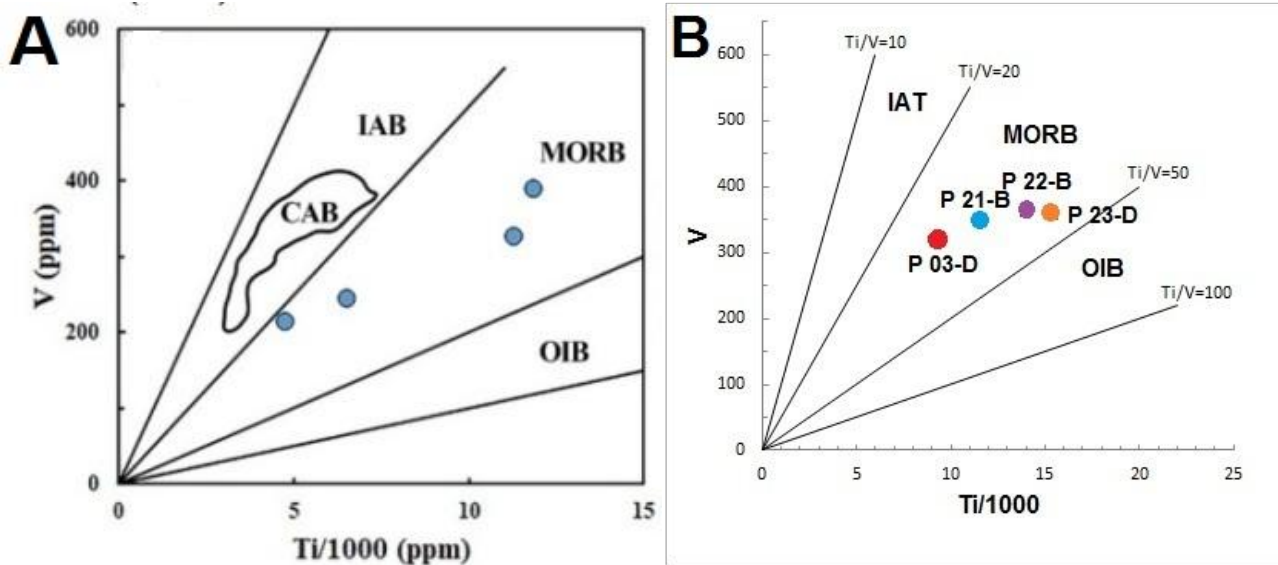


Figura 7- A) Diagrama V vs Ti/1000 (Shervais, 1982) com os anfibólitos de Itapeçerica (Miranda & Chaves, 2021); B) Diagrama V vs Ti/1000 (Shervais, 1982) com os anfibólitos da Sequência de Itaguara. IAT- toleítos de arcos de ilha, MORB- basaltos da dorsal meso-oceânica, OIB-basaltos de ilha oceânica.

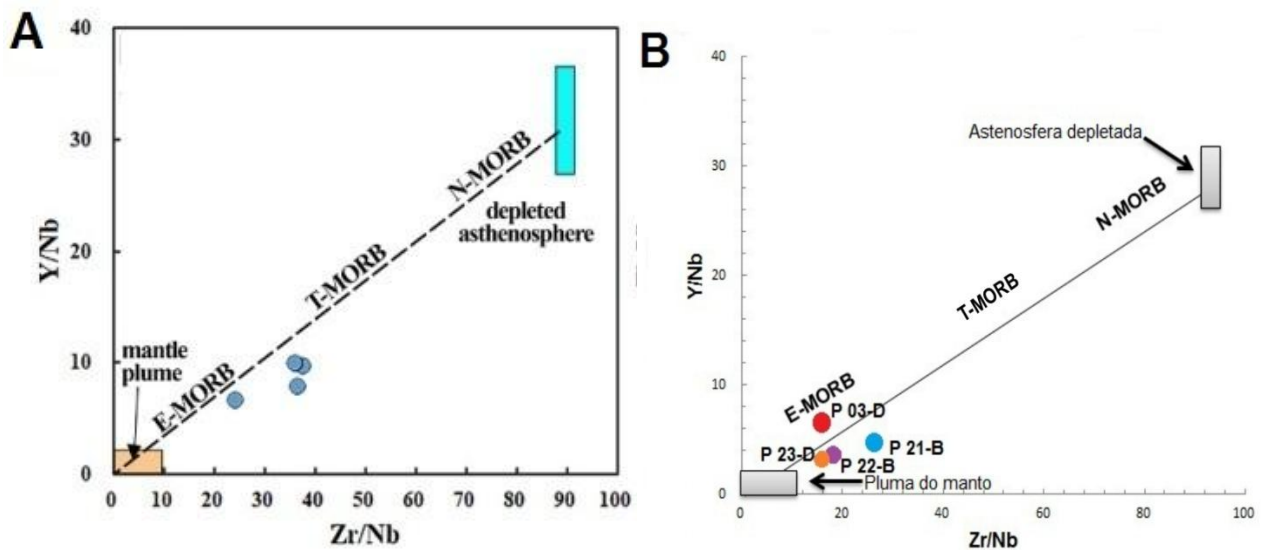


Figura 8- A) Diagrama binário Y/Nb vs Zr/Nb (Xia & Li, 2019) para as amostras de anfibólito de Itapeçerica de Miranda & Chaves (2021). B) Diagrama binário Y/Nb vs Zr/Nb (Xia & Li, 2019) para amostras de anfibólito da Sequência de Itaguara. E-MORB, T-MORB e N-MORB são respectivamente basaltos enriquecidos, transicionais e normais da dorsal meso-oceânica. OIB – basaltos de ilhas oceânicas.

Nos diagramas $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{-FeOt-MgO}$ da figura 9 (Irvine & Baragar, 1971), nota-se que as rochas anfibolíticas de Itapeçerica e da SI caem no campo toleítico. A metaultramáfica de Itapeçerica (Figura 9A) mostra semelhança com as metaultramáficas da SI no diagrama AFM (Figura 3).

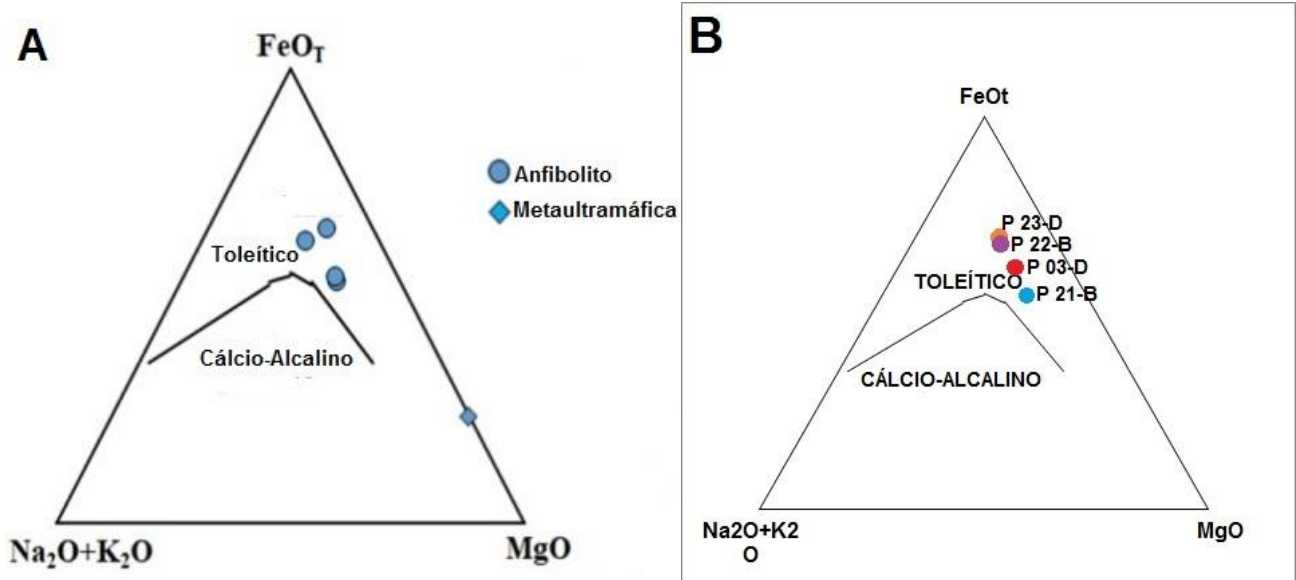


Figura 9- A) Diagrama (Na₂O+K₂O)-FeO_T-MgO (Irvine & Baragar, 1971) para as amostras de anfibolitos e metaultramáficas de Itapecerica (Miranda & Chaves, 2021); B) Diagrama (Na₂O+K₂O)-FeO_T-MgO (Irvine & Baragar, 1971) para as amostras de anfibolito da SI.

Dessa forma, as rochas metamáficas e metaultramáficas da SI e de Itapecerica faziam parte da base de uma sequência ofiolítica durante o paleoproterozoico. Sugere-se que esta sequência ofiolítica esteve associada aos ambientes de zona de suprassubducção, margem continental e/ou uma cadeia meso-oceânica devido a sua assinatura geoquímica E-MORB característica desses ambientes.

REFERÊNCIAS

- CHAVES, A.O. Columbia (Nuna) supercontinent with external subduction girdle and concentric accretionary, collisional and intracontinental orogens permeated by large igneous provinces and rifts. **Precambrian Research**, v. 352, p.106017, 2021.
- CHAVES, A.O.; GOULART, L.E.A.; COELHO, R.M.; MIRANDA, D.A., ARANDA, R.O.; RAMOS, S.L.L.M. High-pressure eclogite facies metamorphism and decompression melting recorded in paleoproterozoic accretionary wedge adjacent to probable ophiolite from Itaguara (southern São Francisco craton-Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v.94, 2019.
- COELHO, R.M. & CHAVES, A.O. Pressure-temperature-time path of Paleoproterozoic khondalites from Claudio shear zone (southern São Francisco cráton, Brazil): Links with khondalite belt of the North China craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v.94, 2019.
- COLEMAN, R.G. Ophiolites, ancient oceanic lithosphere? **Rocks and minerals**, v. 12. Springer, Berlin,1977.
- DILEK Y. & FURNES H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. **Geological Society of America Bulletin**. v. 23, n. 3/4; p. 387-411, 2011.
- EVANS, B.W. & TROMMSDORFF, V. On elongate olivine of metamorphic origin **Geology**, 1974.
- IBGE, **Glossário Geológico**, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, p. 214, 1999.
- IRVINE, T.N. & BARAGAR, W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, **Canadian Journal of Earth Sciences**, v.8, p. 523-548, 1971.
- GILL, R. **Rochas e processos ígneos: um guia prático**. Bookman, 427p., 2014.
- GOURLART, L.E.A. **O Complexo Acamadado Itaguara-Rio Manso, MG**. Dissertação, Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, 210p., 2006.
- GUICE, L.G; MAGALHÃES, J.R.; PINHEIRO, M.A.P.; FERREIRA, R.C.R.; MEIRA, V.T.; MELO-SILVA, P.; ACKERSON, M.R. Spinel-group minerals as a record of magmatic and metamorphic processes: evidence from the highly altered Morro do Onça ultramafic suite, São Francisco Craton (Brazil). **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 177, n. 34, 2022.
- HARTMANN, L.A.; REMUS, M.V.; KOPPE, J.C. Distingão entre textura *spinifex* e arranjos

- de olivina metamórfica. **Revista Brasileira de Geociências**, v.17, n, 3, p. 302-305, 1987.
- MASSUDA, A.J.; HARTMANN, L.A.; QUEIROGA, G.N.; CASTRO, M.P.; LEANDRO, C.G.; SAVIAN, J.F. Mineralogical evolution of the northern Bossoroca ophiolite, São Gabriel terrane. **Brazilian Journal of Geology**, v. 50, n.4, 2020.
- MIRANDA, D.A. & CHAVES, A.O. Itapecerica metamafic-ultramafic rocks with E-MORB signature: ophiolitic remnants of the rhyacian-orosirian orogeny in southern São Francisco craton? **Geociências**, v. 40, n.1, p.1-12, 2021.
- PINHEIRO, S.O. & NILSON, A.A. Metakomatiitic and meta-ultramafic rocks from the Rio Manso region, Minas Gerais: geology textures and metamorphism. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n.3, p. 421-423, 2000.
- SNOKE, A.W. & CALK, L.C. Jackstraw-textured talc-olivine rocks, Preston Peak area, Klamath Mountains, California. **Geological Society of America Bulletin**, v. 89, p. 223-230, 1978.
- WINTER, J.D. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. **Pearson Education**, 2 ed., p. 744 . 2014.