



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA EM GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

FRANK GURGEL SANTOS

**AS ROCHAS (META) MÁFICAS-ULTRAMÁFICAS E O A PALEOARQUEANAS NA
PORÇÃO CENTRAL DO DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE: petrologia,
geoquímica e geocronologia das rochas mais antigas na América do Sul**

Recife
2019

FRANK GURGEL SANTOS

**AS ROCHAS (META) MÁFICAS-ULTRAMÁFICAS E A PALEOARQUEANAS NA
PORÇÃO CENTRAL DO DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE: petrologia,
geoquímica e geocronologia das rochas mais antigas na América do Sul**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geociências.

Área de Concentração: Geoquímica, Geofísica e Evolução Crustal.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Valderez Pinto Ferreira.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Anelise Losangela Bertotti.

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S237r

Santos, Frank Gurgel.

As rochas (meta) máficas-ultramáficas Eo a Paleoarqueanas na porção central do Domínio Rio Grande do Norte: petrologia, geoquímica e geocronologia das rochas mais antigas na América do Sul / Frank Gurgel Santos. - 2019.

82 folhas, il. e quads.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Valderez Pinto Ferreira.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Anelise Losangela Bertotti.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2019.

Inclui Referências, Apêndice e Anexo.

1. Geociências. 2. Arqueano. 3. Província Borborema. 4. Rochas máficas-ultramáficas. 5. Petrologia. 6. Geoquímica. 7. Geocronologia. I. Ferreira, Valderez Pinto (Orientadora). II. Bertotti, Anelise Losangela (Coorientadora). III. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-395

FRANK GURGEL SANTOS

**AS ROCHAS (META) MÁFICAS-ULTRAMÁFICAS E O A PALEOARQUEANAS NA
PORÇÃO CENTRAL DO DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE: petrologia,
geoquímica e geocronologia das rochas mais antigas na América do Sul**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Geociências da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Geociências.

Aprovada em: 02/08/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Valdevez Pinto Ferreira (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Mário Tavares de Oliveira Cavalcanti Neto (Examinador Externo)

Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcos Antônio Leite do Nascimento (Examinador Externo)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico este trabalho à minha esposa Alyne
Gouveia e à minha mãe Socorro Gurgel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e por eu ter saúde física e mental para percorrer os melhores caminhos nessa etapa tão importante e desafiadora. A minha família agradeço por todo apoio e incentivo dedicados. Em especial a minha mãe, Maria do Socorro, e a minha esposa Alyne Gouveia, que sempre estiveram ao meu lado e foram essenciais para eu atingir esse objetivo.

Ao PPGEOC, agradeço o conhecimento adquirido através dos professores Alcides Nobrega Sial, Sérgio Pacheco Neves, Hartmut Beurlen, Gorki Mariano e Ignez Pinho Guimarães no curso das disciplinas para a obtenção dos créditos. Particularmente, agradeço as professoras Valderez Pinto Ferreira e Anelise Losangela Bertotti por aceitarem me orientar, reconheço que são pessoas admiráveis além de profissionais dedicadas. Ao IFRN, agradeço em nome de Mário Tavares Oliveira Cavalcanti Neto, a todos os alunos e bolsistas envolvidos nas etapas de campo e preparação de amostras, fundamentais para a obtenção dos dados dessa dissertação. Agradeço a ajuda relevante da Laisa Assis nas análises geocronológicas que foram realizadas na USP. Ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM agradeço pelo estímulo à formação continuada e a colaboração para que seus profissionais estejam em constante evolução. Ao amigo geólogo Prof.^o Dr. Marcos Antônio Leite dos Nascimento (UFRN) por aceitar participar da banca para a defesa da dissertação.

Agradecimento especial ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que forneceu recursos financeiros para as etapas de campo, análises químicas e geocronológicas através do projeto número 1533695260888392.

RESUMO

A Província Borborema (PB) está localizada na parte nordeste da Plataforma Sul Americana e apresenta uma montagem bastante complexa, onde as expressivas zonas de cisalhamento delimitam os seus domínios. A área de estudo encontra-se no Domínio Rio Grande do Norte, que é composto por um embasamento gnáissico-migmatítico atribuído ao Complexo Caicó, além de paragneisses, quartzitos e xistos das formações Jucurutu, Equador e Seridó, pertencentes ao Grupo Seridó. As rochas (meta) máficas-ultramáficas (serpentinitos, anfibólio-xistos e anfibolitos), que são o objeto principal do estudo, se apresentam sob a forma de corpos lenticulares dispersos por aproximadamente 30 quilômetros seguindo o *trend* regional e ocorrem encaixadas nos litotipos do Complexo Caicó e Grupo Seridó. Os serpentinitos ocorrem como corpos alongados em exposições relativamente pequenas, em contato com os xistos, paragneisses e ortogneisses. Eles consistem em serpentina xenoblástica (75-99%) que se apresenta substituindo os minerais ferromagnesianos primários do protólito. Os anfibólio-xistos e anfibolitos são esbranquiçados (tremolita), acinzentados (talco) ou mesmo esverdeados (actinolita), dependendo do mineral dominante. As rochas apresentam altos teores de MgO, Ni, Cr₂O₃ e muito baixos teores de TiO₂, Na₂O e K₂O, mostrando uma assinatura komatiítica e são composicionalmente similares às encontradas em *greenstone belts* arqueanos em todo o mundo. Os dados isotópicos de U-Pb (SHRIMP) em grãos de zircão indicam idades concordantes de 3526 ± 5 Ma para o serpentinito da Mina Serra Verde e 3747 ± 12 Ma para o serpentinito da Mina Oiticica. A caracterização petrográfica, química e a idade Eo a Paleoarqueana encontradas nas rochas estudadas são muito relevantes para esta parte da PB e assim propomos que estas rochas máficas-ultramáficas são as mais antigas na América do Sul e façam parte de um *greenstone belt* arqueano desmembrado.

Palavras-chave: Arqueano. Província Borborema. Rochas máficas-ultramáficas. Petrologia. Geoquímica. Geocronologia.

ABSTRACT

The Borborema Province (PB) is located in the northeastern part of the South American Platform and presents a very complex assembly, which is marked by expressive shear zones that delimit its domains. The study area is located in the Rio Grande do Norte Domain, which is composed of a gneissic-migmatitic basement attributed to the Caicó Complex, besides paragneisses, quartzites and schists of the Jucurutu, Equador and Seridó formations of the Seridó Group. The metamafic-ultramafic rocks (serpentinites, amphibolites-schists and amphibolites), that are the main object of the study, occur as lenticular bodies dispersed for approximately 30 kilometers, following the regional trend, and occur embedded in the lithotypes of the Caicó Complex and Seridó Group. Serpentinites occur as elongated bodies in relatively small exposures, in contact with the schists, paragneisses and orthogneisses. It consists of xenoblastic serpentine (75-99%) that replaces the primary ferromagnesian minerals of the protolith. Amphibolite-schists and amphibolites are whitish (tremolite), grayish (talc) or even greenish (actinolite), depending on the dominant mineral. The rocks have high contents of MgO, Ni, Cr₂O₃ and very low contents of TiO₂, Na₂O and K₂O, showing komatiitic signature, and have composition similar to those found in Archaean greenstone belts around the world. The isotopic data of U-Pb (SHRIMP) in zircon grains indicate concordant ages of 3526 ± 5 Ma for the serpentinite of the Serra Verde Mine and 3747 ± 12 Ma for the serpentinite of the Oiticica Mine. The petrographic, chemical characterization and Eo to Paleoarchean age found in the studied rocks are very relevant for this part of the PB and so we propose that these mafic-ultramafic rocks are the oldest rocks in South America and form part of a dismembered Archean greenstone belt.

Keywords: Archean. Borborema Province. Mafic-ultramafic rocks. Petrology. Geochemistry. Geochronology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Figura 1 - Localização aproximada da área de estudo no contexto geológico regional da Província Borborema. Fonte: Brito Neves et al. (2000), Van Schmus et al. (2011) e Neves (2015). Adaptada de Ancelmi (2016).....	12
Figura 2 -	Mapa de localização da área de estudo dentro do estado do Rio Grande do Norte com as vias de acesso. Fonte: O autor (2019).....	15
Quadro 1 -	Ocorrência de rochas arqueanas no Domínio RGN da PB separados pela zona de cisalhamento Picuí-João Câmara.....	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	APRESENTAÇÃO.....	10
1.2	CONFIGURAÇÃO GEOLÓGICA.....	11
1.3	OBJETIVOS E ESTADO DA ARTE.....	13
1.4	LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	15
1.5	METODOLOGIA.....	16
2	RESULTADOS.....	18
3	EO TO PALEOARCHEAN METAMAFIC-ULTRAMAFIC ROCKS FROM THE CENTRAL PORTION OF THE RIO GRANDE DO NORTE DOMAIN, BORBOREMA PROVINCE, NORTHEAST BRAZIL: THE OLDEST SOUTH AMERICAN PLATFORM ROCKS.....	19
4	SERPENTINITOS DA PORÇÃO CENTRAL DO DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE, PROVÍNCIA BORBOREMA, NORDESTE DO BRASIL: CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA.....	50
5	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS.....	75
	APÊNDICE A - TABELA DE AFLORAMENTOS.....	80
	ANEXO A - CARTAS DE SUBMISSÃO.....	81

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação é parte da exigência para a obtenção do grau de Mestre em Geociências pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGEOC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), juntamente com a submissão de dois artigos científicos em periódicos nacional ou internacional.

Este trabalho foi orientado pela professora Doutora Valderez Pinto Ferreira, coorientado pela professora Doutora Anelise Losangela Bertotti e está incluso na área de concentração de Geoquímica, Geofísica e Evolução Crustal.

1.1 APRESENTAÇÃO

Rochas de idade arqueana ($> 2,5$ Ga) ocupam pequenas extensões aflorantes em todos os continentes, sendo que a maioria dos depósitos de minerais metálicos (Fe, Ni, Au, Ag, Cu e Cr) do mundo ocorre em associações litológicas do tipo *greenstone belt* que são majoritariamente de idade arqueana (CONDIE, 1981), com alguns exemplares Paleoproterozoicos menos frequentes. Além da relevância econômica, as rochas arqueanas contêm informações geoquímicas diretas da diferenciação planetária inicial da Terra (BOWRING; HOUSH, 1995), fornecendo informações confiáveis sobre a evolução do planeta durante essa era.

Associações Tonalito-Trondhjemito-Granito (TTG) e rochas máficas-ultramáficas Paleoarqueanas são os remanescentes de crosta mais antigos da América do Sul (MARTIN et al., 1997; BARBOSA; SABATÉ, 2004; DANTAS et al., 2004; RUIZ et al., 2018) e estão localizados no nordeste do território brasileiro, mais precisamente no Cráton São Francisco e na Província Borborema, com mineralizações importantes relacionadas a litotipos Paleoproterozoicos (SILVA et al., 1998; GRANDJEAN DA COSTA, 2018).

Contudo, porções crustais arqueanas sempre atraíram a atenção de pesquisadores das geociências (e áreas afins) concentrados na procura de novas descobertas, para o aprimoramento dos conhecimentos atuais. Dessa forma, a descoberta recente de corpos máficos-ultramáficos pré-cambrianos no Domínio Rio Grande do Norte da Província Borborema associados a mineralizações (minerais metálicos e gemas) mostrou um arranjo compatível com o que se espera de um *greenstone belt*, mas como a idade e o posicionamento geotectônico conhecidos até então eram de caráter duvidoso, se fez necessário estudos mais detalhados para o avanço do conhecimento nessa área.

1.2 CONFIGURAÇÃO GEOLÓGICA

A Província Borborema (PB) é uma das 10 Províncias Estruturais Brasileiras e está localizada no extremo nordeste do território brasileiro, sendo limitada a sul pelo Cráton São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a norte e a leste pelas bacias costeiras da margem continental. Foi descrita como uma região de dobramentos Brasilianos apresentando um arranjo complexo, em mosaico, incluindo diferentes sistemas de dobras separados por partes elevadas do embasamento, relacionadas ou não a falhas (ALMEIDA et al., 1981).

A PB compreende a parte nordeste da plataforma Sul Americana e é resultado da convergência tectônica dos crátons do Oeste Africano-São Luís e São Francisco-Congo, como parte da consolidação do Gondwana Oeste (CABY, 1989; ARTHAUD et al., 2008). Correlações geológicas entre o nordeste do Brasil e o oeste e centro da África têm sido realizadas por diversos autores (DANTAS et al., 2004, 2013).

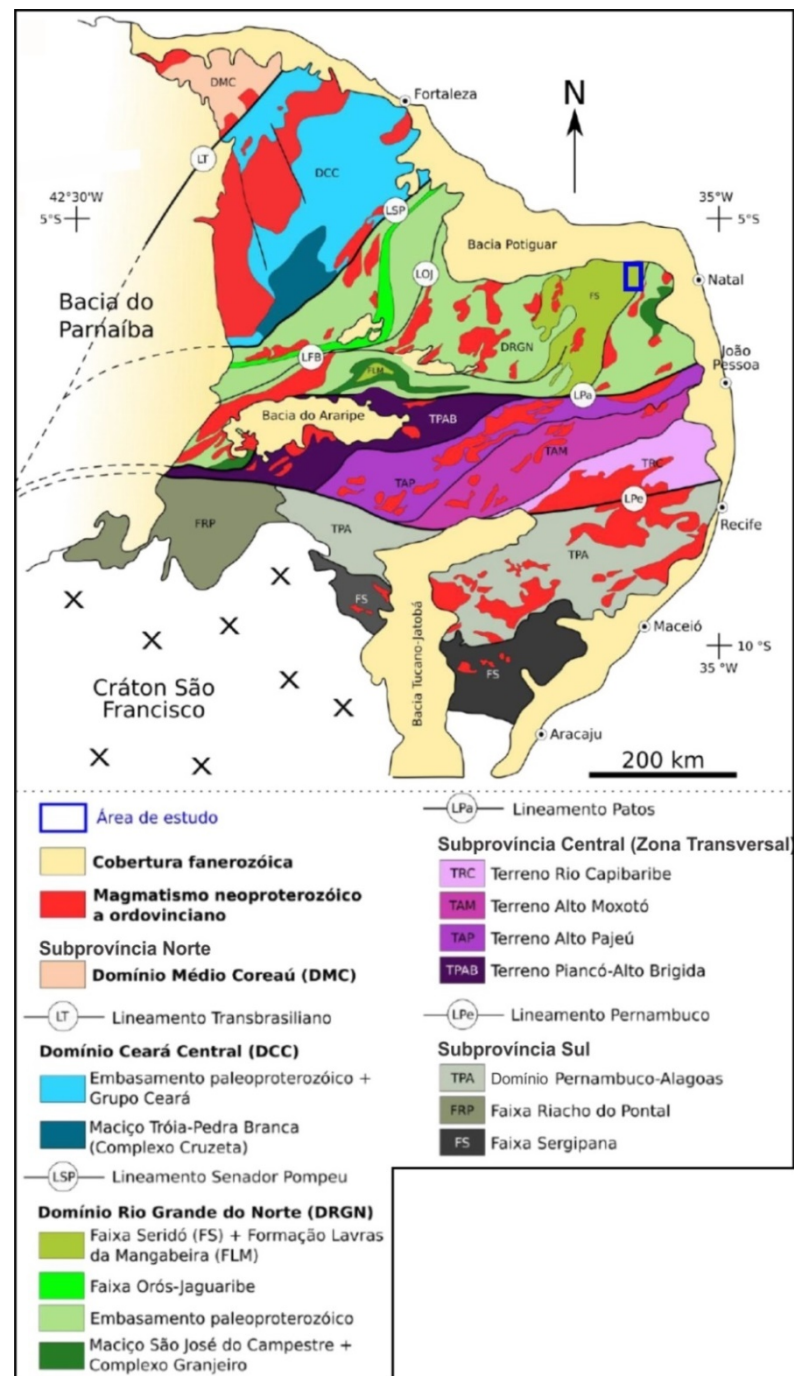
A PB consiste de um embasamento gnáissico-migmatítico Arqueano a Paleoproterozoico sobreposto por sequências supracrustais, e todo esse pacote de rochas foi intrudido por uma grande quantidade de granitoides Neoproterozoicos (JARDIM DE SÁ, 1994; SOUZA et al., 2007, 2015). A PB é caracterizada por um complexo sistema Neoproterozoico de zonas de cisalhamento de alta temperatura com escala crustal (VAUCHEZ et al., 1995), que define uma configuração de domínios tectônicos independentes. De uma forma geral, a PB está dividida em (Figura 1): Subprovíncia Sul, localizada entre o Lineamento Pernambuco e o Cráton São Francisco, compreendendo o Domínio Pernambuco-Alagoas e as faixas Sergipana e Riacho do Pontal; Subprovíncia Central ou Zona Transversal, ocorre entre os lineamentos Pernambuco e Patos e é subdividida, de leste para oeste, nos terrenos Rio Capibaribe, Alto Moxotó, Alto Pajeú e Piancó-Alto Brígida; Subprovíncia Norte, situada a norte do Lineamento Patos e sendo composta pelos domínios Rio Grande do Norte (RGN), Ceará Central e Domínio Médio Coreá (BRITO NEVES et al., 2000; VAN SCHMUS et al., 2011; NEVES, 2015).

Três eventos de deformação são relatados no Domínio RGN: D1 está associado a dobras isoclinais a intrafoliais e forte transposição, seguido por um evento de cinemática tangencial D2. O último evento tectonometamórfico (D3) é marcado por zonas de cisalhamento transcorrentes a oblíquas e colocação de granitoides tardios do Neoproterozóico (Brasiliano). O metamorfismo associado varia de anfibolito superior a granulito perto de intrusões plutônicas e zonas de cisalhamento em

escala crustal e fácies xisto verde em outros lugares (JARDIM DE SÁ, 1994; JARDIM DE SÁ et al., 1995; SOUZA et al., 2007).

A área de estudo (Figura 1) deste trabalho está dentro dos limites do Domínio RGN e localiza-se entre os municípios de São Tomé, Lajes e Caiçara do Rio Do Vento, agreste potiguar.

Figura 1 - Localização aproximada da área de estudo no contexto geológico regional da Província Borborema.



Fonte: Brito Neves et al. (2000), Van Schmus et al. (2011) e Neves (2015). Adaptada de Ancelmi (2016).

1.3 OBJETIVOS E ESTADO DA ARTE

A presente dissertação tem como objetivo mapear e caracterizar os corpos (meta) máficos-ultramáficos em termos de estudo petrogenético, litoquímico e geocronológico dessas rochas encontradas na região compreendida entre os municípios de Lajes, São Tomé e Caiçara do Rio do Vento, no contexto geológico das Minas Bonfim (Au, W, Bi e Te), Oiticica (W) e Serra Verde (esmeralda), região central do estado do Rio Grande do Norte.

Tem por objetivos específicos:

- Mapear os corpos (meta) máficos-ultramáficos da área de estudo e utilizar as técnicas de geoprocessamento para cartografar as rochas máficas-ultramáficas representando-as em um mapa geológico atualizado em escala adequada;
- Caracterizar petrograficamente os corpos (meta) máficos-ultramáficos mapeados;
- Caracterizar litoquimicamente os corpos (meta) máficos-ultramáficos mapeados;
- Caracterizar geocronologicamente os corpos (meta) máficos-ultramáficos mapeados, utilizando o método U-Pb;
- Discutir e propor modelo tectônico baseado nos trabalhos de campo de detalhe e nos dados geoquímicos elementares e isotópicos obtidos nas amostras.

Desde as primeiras definições mais detalhadas do Complexo Caicó (JARDIM DE SÁ, 1994; FERREIRA; SANTOS, 2000), lentes de rochas máficas-ultramáficas de composição anfibolítica/serpentinítica são atribuídas a essa unidade, e mesmo com a subdivisão em unidades metavulcanossedimentar e metaplutônica, as lentes sempre foram tratadas como parte deste complexo. Angelim et al. (2006) inseriram mais uma compartimentação, além das outras duas já propostas anteriormente, e estabeleceram a unidade indivisa no Complexo Caicó, que é constituída por litotipos mapeáveis em posicionamento estratigráfico duvidoso, que inclui as rochas máficas-ultramáficas.

No ano de 2005, buscando delimitar alvos para os altos teores de níquel e cromo identificados na geoquímica regional, a empresa EMPROGEO LTDA. identificou rochas ultrabásicas que explicariam esses teores anômalos, e de forma

acidental, a mineralização de esmeraldas da mina Serra Verde foi descoberta de forma associada. Dessa forma, por estarem diretamente ligadas a uma mineralização importante, as rochas máficas-ultramáficas começaram a receber mais atenção e a serem publicadas as primeiras descrições mais detalhadas desses litotipos na região central do Rio Grande do Norte.

No estudo de Cavalcanti Neto e Barbosa (2007) o serpentinito da mina Serra Verde foi denominado como “Faixa de Rochas Ultrabásicas”, sem relacioná-las ao Complexo Caicó, enquanto Mendes da Costa (2012) reconheceu uma tendência fortemente magnesianas com assinatura komatiítica/toleítica para serpentinitos e xistos máficos na área de estudo e os posicionou como correlatos ao Complexo Caicó. O mesmo ocorreu com Costa e Dantas (2014), Ranier Dantas (2017) e Costa e Dantas (2018) que identificaram alguns dos corpos máficos-ultramáficos (metahornblenditos, serpentina-talco xistos e clorita-actinolita xistos) que serão detalhados nesse estudo, e os mapearam como pertencentes ao Complexo Caicó. Costa et al. (2018) também identificaram metapiroxenitos, metagabros e metanfíbolitos em mapeamento regional com a diferença que pela primeira vez uma idade arqueana foi atribuída a esses litotipos dentro dos limites da área de estudo.

Nos arredores da área de estudo também há ocorrência de corpos máficos-ultramáficos. Do lado oeste, Dantas Ferreira (2015) reportou a presença de quatro intrusões máficas-ultramáficas (clinopiroxenito, wherlito, hornblendito e troctolito) com idade Paleoproterozoica (≈ 2192 Ma) que podem facilmente ser atribuídas ao Complexo Caicó; a aproximadamente 50 quilômetros a leste da área de estudo, Jesus (2011) identificou uma intrusão Mesoarqueana (3083 ± 17 Ma) de composição máfica-ultramáfica (gabros, dioritos, peridotitos, piroxenitos, dunitos serpentinizados, wherlitos e lherzolitos) denominada de Complexo Riacho da Telha que está inserida no contexto do Maciço São José do Campestre.

Apesar de várias publicações, as rochas de composição máfica-ultramáfica da área de estudo ainda requerem maior investigação. Em estudos recentes (SANTIAGO, 2017; RUIZ, 2018), dados relevantes sobre os litotipos máficos-ultramáficos da região foram publicados constatando que apesar de se colocarem em contato com ortognaisses e migmatitos atribuídos ao Complexo Caicó (Paleoproterozoico) e rochas metassedimentares do Grupo Seridó (Neoproterozoico) essas rochas merecem mais atenção quanto ao posicionamento na geologia regional. As diversas zonas de cisalhamento (Santa Mônica, Serra Verde, Bonfim,

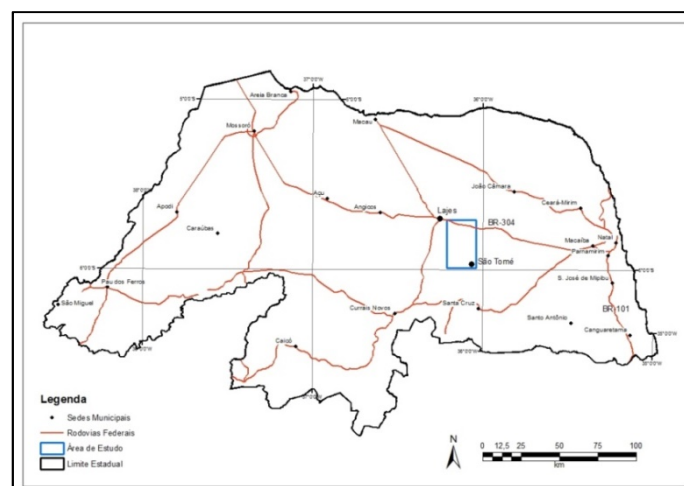
São Francisco, Picuí-João Câmara) Neoproterozoicas (ANGELIM et al., 2006) tiveram papel fundamental na reorganização química e espacial desses corpos que por sua vez carecem de melhor definição quanto ao seu significado geotectônico, já que a idade arqueana encontrada coloca essas rochas numa posição estratigráfica diferente do Complexo Caicó, como é defendido até agora.

A presente dissertação vislumbra como significativos resultados esperados um melhor conhecimento geológico e a proposição de um cenário geológico atualizado sobre as rochas da área investigada.

1.4 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo está localizada no nordeste do Brasil, nas proximidades dos municípios de Lajes e São Tomé, região central do estado do Rio Grande do Norte (Figura 2). Estes municípios foram tomados como ponto de hospedagem durante os trabalhos de campo, pelo fato de se posicionar nos extremos norte e sul na área, respectivamente. Partindo da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em Recife, o trajeto tomado até a área de estudo é a partir da BR-101 no sentido norte até o município de Parnamirim-RN e depois seguindo no sentido oeste pela BR-304 até o município de Lajes-RN, num percurso total de 390 quilômetros e 5 horas de duração. A área mapeada possui cerca de 590 km² e localiza-se entre as coordenadas UTM, segundo o datum SIRGAS2000 e zona 24M: 809000 e 828000 W, 9368200 e 93371000 S, e coordenadas geográficas 36°02'25" e 36°12'35" a oeste da linha de Greenwich, e 5°42'30" e 5°59'25" a sul da linha do Equador.

Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo dentro do estado do Rio Grande do Norte com as vias de acesso.



Fonte: O autor (2019).

1.5 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos a esta pesquisa foram realizados trabalhos de campo para observações e coleta de amostras. Os trabalhos de escritório foram iniciados antes da primeira ida ao campo e os trabalhos de laboratório foram realizados durante todo o período de estudos.

As principais atividades realizadas:

- Pesquisa bibliográfica sobre a geologia da região: a revisão da bibliografia foi uma etapa constante durante a evolução dos trabalhos desta dissertação, sendo possível acompanhar a evolução dos conhecimentos através das publicações mais recentes e atualizar de forma continua sobre as discussões a respeito das rochas (meta) máficas-ultramáficas do Domínio Rio Grande do Norte da Província Borborema.
- Atividade de campo para coleta de dados: foram realizadas várias etapas de campo entre abril de 2011 a julho de 2018 com mais de 400 pontos levantados com a finalidade de detalhar os corpos (meta) máficos-ultramáficos que ocorrem em contato com os gnaisses do Complexo Caicó e rochas metassedimentares do Grupo Seridó.
- Seleção de amostras e confecção de lâminas de seção delgada para estudos petrológicos: após as etapas de campo, as amostras mais representativas e com menor interferência do metamorfismo regional foram selecionadas para a confecção de seções delgadas no laboratório de laminação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB).
- Seleção, preparação e envio de amostras para análises químicas onde foram analisados elementos maiores, menores e traços: as amostras selecionadas para a análise química foram preparadas no laboratório de preparação de amostras do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, onde passaram pelo processo de britagem e pulverização antes de serem enviadas ao laboratório *Veritas Commodities Canada Ltd.* (Acme Labs) para serem analisadas quimicamente.
- Análises qualitativas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) com EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) acoplado: foram analisados os elementos Ni, Fe, Cr, Si e Mg no microscópio eletrônico de varredura (MEV) com EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), realizadas no Laboratório de Dispositivos e

Nanoestruturas (LDN) do departamento de Engenharia Eletrônica da Universidade Federal de Pernambuco. Duas lâminas de seção delgada foram metalizadas com carbono e os pontos que sugeriam a presença do mineral olivina em microscópio petrográfico foram marcados como *spots* para o estudo no Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 6460.

- Seleção, preparação e envio de amostras para análise isotópica pelo método U-Pb em zircão (SHRIMP), feita na USP: as amostras selecionadas para análise geocronológica foram preparadas no laboratório de preparação de amostras do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, onde passaram pelo processo de britagem, pulverização, peneiramento e concentração por líquido denso antes de serem enviadas ao laboratório de Geocronologia da Universidade de São Paulo (USP) e obter a datação pelo método U-Pb (SHRIMP).
- Tratamento dos dados: as informações de campo foram utilizadas para a confecção de um mapa em escala adequada usando o software ArcMap 10.7 e os dados de análises químicas e isotópicas foram processados para a produção de gráficos e diagramas geoquímicos através dos softwares GCDKit 4.1 e Microsoft Excel.
- Compilação, integração e interpretação dos dados obtidos nas etapas anteriores para a composição desta dissertação de mestrado.

2 RESULTADOS

Os resultados obtidos na presente dissertação de mestrado encontram-se apresentados em dois artigos científicos. O primeiro tem como título: “*Eo to Paleoarchean Metamafic-ultramafic Rocks from the Central Portion of the Rio Grande do Norte Domain, Borborema Province, Northeast Brazil: The oldest South American Platform Rocks*”. Este artigo apresenta o mapeamento geológico da área de estudo, juntamente com os dados petrográficos, geoquímicos e geocronológicos das rochas máfica-ultramáficas em questão, e a implicação geotectônica destas.

No segundo artigo, intitulado: “Serpentinitos da Porção Central do Domínio Rio Grande do Norte, Província Borborema, Nordeste do Brasil: Petrologia e Geoquímica”, são utilizados os dados de campo e geoquímicos para apresentar as características petrográficas e químicas individuais dos serpentinitos encontrados nas minas Serra Verde e Oiticica, nos arredores do município de São Tomé-RN. As cartas de submissão dos referidos artigos encontram-se no anexo II deste trabalho.

3 EO TO PALEOARCHEAN METAMAFIC-ULTRAMAFIC ROCKS FROM THE CENTRAL PORTION OF THE RIO GRANDE DO NORTE DOMAIN, BORBOREMA PROVINCE, NORTHEAST BRAZIL: THE OLDEST SOUTH AMERICAN PLATFORM ROCKS

Frank G. Santos ^{a,c,*}, Mário T. O. Cavalcanti Neto ^b, Valderéz P. Ferreira ^c, Anelise L. Bertotti ^c

^a Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Superintendência Regional do Recife, Avenida Sul, 2291, Afogados, Recife, Pernambuco, Brasil

^b Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável dos Recursos Naturais do IFRN – IFRN, Campus Natal Central, Avenida Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

^c Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Geologia, Avenida da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil

Abstract

Metamorphosed mafic-ultramafic rocks from the central portion of the Rio Grande do Norte Domain, Borborema Province (BP), northeastern Brazil, have been studied here with the objective of provide more clues on the knowledge of the Archean evolution in this part of the BP. The studied area is composed of gneissic-migmatitic basement rocks, and biotite schists and paragneisses from the Seridó and Jucurutu formations of the Seridó Group. The mafic-ultramafic rocks (serpentinites, amphibole-schists and amphibolites) occur in lenses for 30 kilometers, following the NNE regional foliation. Serpentinites occur as elongated bodies in relatively small exposures, in contact with paragneisses (Jucurutu Formation) and orthogneisses (Caicó Complex). They consist of xenoblastic serpentine (75-99%) that occurs replacing the primary ferromagnesian minerals of the protolith. The amphibole schists and amphibolites are whitish, grayed, or greenish, depending on the dominant mineral phase (tremolite, talc or actinolite, respectively). The rocks present high MgO, Ni and Cr₂O₃ contents and very low TiO₂, Na₂O and K₂O contents, being compositionally similar to others ones found on Archean greenstone belts worldwide. The U-Pb (SHRIMP) isotope zircon data indicate concordia ages of 3526 ± 5 Ma

(MSWD = 0.0084) for serpentinite of Serra Verde Mine and 3747 ± 12 Ma (MSWD = 9.8) for serpentinite of Oiticica Mine. The petrographic, chemical characterization and the Eo to Paleoarchean age found in the studied rocks are very relevant to this part of BP, where the dominant basement is Paleoproterozoic, and will lead a further discussion about the understanding of the regional crustal evolution. We propose that these mafic-ultramafic rocks are part of a dismembered Archean greenstone belt, and their ages are the oldest so far recorded in the South American Platform.

Keywords: Archean; Mafic-Ultramafic rocks; Caicó Complex; Borborema Province; Petrology.

- The mafic-ultramafic rocks have geochemical signature akin to Archean greenstone belts.
- The mafic-ultramafic rocks may be a part of a dismembered greenstone belt.
- Zircon U-Pb dating indicates Eo to Paleoarchean crystallization age of the protolith.
- Archean crust in this part of Borborema Province may be more extensive than previously envisaged.

1. Introduction

The Archean is a time interval of the history's Earth known for presenting special characteristics. Mantle temperatures are commonly considered to have been significantly higher in the Archean than they are today, the plates were probably smaller than the modern ones, and their spreading rates were faster (MARTIN, 1986). Consequently, the majority of oldest isotopically dated rocks on Earth occupy relatively small exposures, and often occur as remnants ancient crustal nuclei with Mesoarchean to Neoarchean ages (ca. 3200-2500 Ma) in cratonic basements (ANHAEUSSER, 2014). These Archean crusts is essentially composed of basalt-komatiite as a part of greenstone belts and tonalite-trondhjemite-granite (TTG) associations (TAYLOR; MCLENNAN, 1997) and contain direct geochemical information of the Earth's early planetary differentiation (BOWRING; HOUSH, 1995) by give reliable information about the evolution of this Eon.

The Rio Grande do Norte Domain (RGND), on the northernmost part of the Borborema Province (BP) in NE Brazil, record the 3.50 Ga ultramafic rock of São

Tomé Intrusion (RUIZ et al., 2018), 3.5-3.4 Ga orthogneisses of São José do Campestre Massif (DANTAS et al., 2004), 2.79-2.54 Ga orthogneisses of Granjeiro Complex (HOLLANDA et al., 2015) and 2.51-2.50 Ga orthogneisses of Saquinho Complex (CAVALCANTE et al., 2018) as the remnants of Archean nuclei. Other parts of BP also register Archean crusts, which include the 2.7 Ga Entremontes Complex (CRUZ et al., 2014) in Southern Subprovince, 2.6 Ga Riacho das Lajes Suite (LIRA SANTOS et al., 2017) in Central Subprovince and 2.7-2.8 Ga Tróia Massif (GANADE et al., 2017) in Northern Subprovince.

In this paper, we present U-Pb (SHRIMP) geochronological data in zircon, in addition to field relationships, petrography and whole-rock geochemistry of newly discovered metamafic-ultramafic rocks of Eoarchean and Paleoarchean age. This study contributes to a better understanding of the origin of these rocks that had poorly reported in this part of BP and record the oldest rocks on South American Platform.

2. Regional Geological Setting

The Borborema Province (BP) (ALMEIDA et al., 1981) comprises the northeastern part of the South American platform and it is a result of a tectonic convergence of the West Africa-São Luis and São Francisco-Congo cratons (CABY, 1989; ARTHAUD et al., 2008), as part of the West Gondwana assembly. This province is limited to the south by the São Francisco Craton, to the west by the Parnaíba Basin and to the north and east by Phanerozoic coastal basins (Fig.1).

The BP consists of an Archean to Paleoproterozoic gneissic-migmatitic basement with supracrustal sequences deposited over it, and all this package of rocks has been intruded by large amounts of Neoproterozoic granitoids (SOUZA et al., 2007; 2015), and cross-cut by a complex Neoproterozoic system of crustal-scale high-temperature transcurrent shear zones (VAUCHEZ et al., 1995) that define sets of independent tectonic domains. In general, BP is divided into (Fig. 1): Southern Subprovince, located between the Pernambuco Lineament

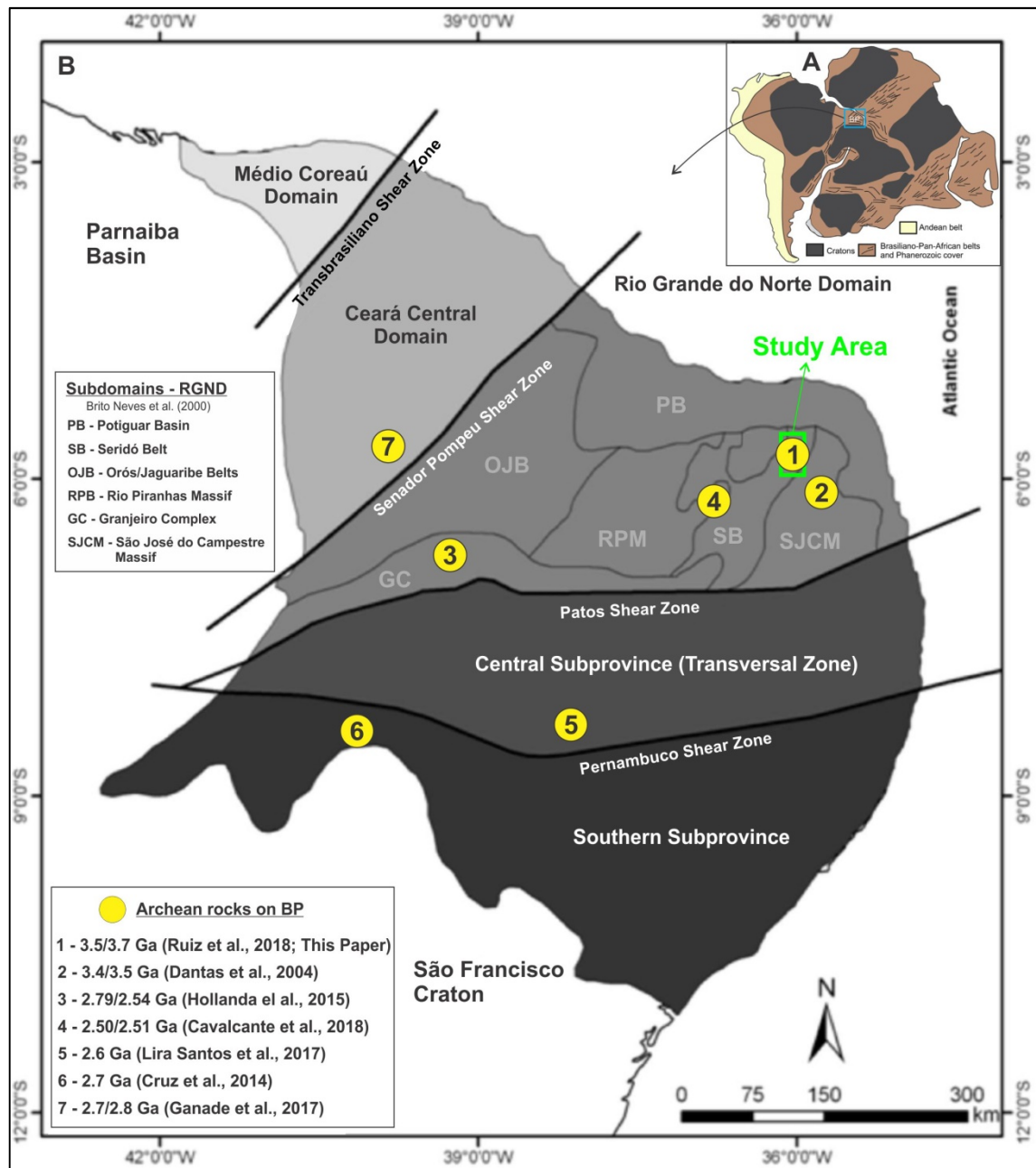


Figure 1 – A: Pre-drift reconstruction of South America-Africa showing the Andean belt, Archean/Proterozoic cratons and Brasiliano/Pan-African provinces of western Gondwana. BP - Borborema Province. Extracted from Neves (2015). B: Study area highlighted in green rectangle in the Rio Grande do Norte Domain of the Borborema Province, northeastern Brazil. Tectonic partitioning according to Brito Neves et al. (2000), Van Schmus et al. (2011) and Neves (2015). Modified from Jesus (2011). Yellow circles show the Archean rocks on Rio Grande do Norte Domain with ages and references.

and the São Francisco Craton, comprising the Pernambuco-Alagoas Domain and the Sergipano and Riacho do Pontal belts; Central Subprovince or Transversal Zone, between the Pernambuco and Patos lineaments and is subdivided, from east to west,

into the Rio Capibaribe, Alto Moxotó, Alto Pajeú and Piancó-Alto Brígida terranes; Northern Subprovince, located north of the Patos Lineament and composed of the Rio Grande do Norte, Ceará Central and Médio Coreaú domains (BRITO NEVES et al., 2000; VAN SCHMUS et al., 2011; NEVES, 2015).

The RGND is composed by São José do Campestre and Rio Piranhas massifs, Granjeiro Complex and Orós-Jaguaribe and Seridó belts as subdomains. The São José do Campestre Massif is characterized by different episodes of accretion and magmatism, reflected by a variety of six orthogneisses assemblages ranging from 2.7 to 3.4 Ga (DANTAS et al., 2004). The Granjeiro Complex is designated by 2.54-2.79 Ga orthogneisses (SILVA et al., 1997; Hollanda et al., 2015) and a metavolcanosedimentary sequence (metamafic-ultramafic, banded iron quartzite, meta greywacke) surrounded by undivided 2.19 Ga gneisses and migmatites (SILVA et al., 1997). The Rio Piranhas Massif has the Caicó Complex as basement, which is subdivided in two units: metavolcanosedimentary and metaplutonic, the latter is dominant and composed by quartzdiorites, meta-gabbro, meta-ultramafic and tonalitic/granitic/granodioritic gneisses, both units present high-grade metamorphism and Paleoproterozoic (ca. 2.2 Ga) age (SOUZA et al., 2007). The Orós-Jaguaribe Belt is a metavolcanosedimentary sequence which includes subordinated orthogneisses (syenogranitic to monzogranitic composition) with magmatic crystallization ages ranging from 1.79 to 1.67 Ga (SÁ et al., 1995, 2014; VAN SCHMUS et al., 1995). The Seridó Belt It is a Neoproterozoic (0.61-0.65 Ga) sequence predominantly metapelitic and can be divided into the formations: Jucurutu at the base, Equador at the middle and Seridó on top according to Jardim de Sá (1994) and Van Schmus et al. (1995, 2003), but Hollanda et al. (2015) argue that the Equador Formation could be at the base. Also in Neoproterozoic (0.57-0.63 Ga), a large amount of Ediacaran granitic plutons took place (NASCIMENTO et al., 2015).

Three events of deformation are reported in RGND: D1 is associated with isoclinal to intrafolial folds and strong transposition, followed by an event of tangential kinematics D2. The last tectono metamorphic event (D3) is marked by transcurrent to oblique shear zones and emplacement of the late Neoproterozoic (Brasiliano) granitoids. The associated metamorphism ranges from upper amphibolite to granulite facies near plutonic intrusions and crustal-scale shear zones to greenschist facies in other places (JARDIM DE SÁ, 1994; JARDIM DE SÁ et al., 1995; SOUZA et al., 2007).

3. Local Geological Setting

The study area is located in the eastern part of the RGND (Fig.2). The basement in the studied area consists of the Caicó Complex that is composed of Paleoproterozoic (2.20-2.15 Ga) age (SOUZA et al., 2007). The Caicó Complex is divided in metavolcano-metasedimentary (metabasalts, amphibole-gneisses, felsic-intermediate metatuffs and silimanite-muscovite-garnet-biotite gneisses) and metaplutonic (gabbroic, tonalitic, granodioritic and granitic composition) units that were metamorphosed in the upper amphibolite to granulite facies near plutonic intrusions (JARDIM DE SÁ, 1994). This basement is covered by the Seridó Group, a Neoproterozoic (0.61-0.65 Ga) supracrustal sequence (VAN SCHMUS et al., 2003) which includes Jucurutu Formation (dominant paragneisses and intercalations of marbles, quartzites, calcsilicated rocks, metaconglomerates, metavolcanics rocks and iron formations) at the base, quartzites and metaconglomerates of the Equador Formation at the middle and the mica schists of the Seridó Formation at the top (with diverse intercalations of marbles, metavolcanics rocks, calc-silicates rocks and metaconglomerates) (JARDIM DE SÁ, 1994).

The RGND was the scene of expressive magmatism of Ediacaran age during the Brasiliano orogeny, when a massive plutonism with wide range of composition took place between 0.6 and 0.5 Ga (CABY et al., 1991; JARDIM DE SÁ, 1994; SOUZA et al., 2015).

The serpentinites and amphibole-schists that are the subject of this paper outcrop near the city of São Tomé, State of Rio Grande do Norte, occurring in discontinuous lenses no larger than 300 meters, aligned to the NNE-trend of regional foliation for about 30 kilometers. These lithotypes are related to gneisses and migmatites of the Caicó Complex and metasedimentary rocks of the Seridó Group, and were strongly affected by regional shear zones. These rocks show a close relationship with metallic and gemological mineral ore deposits, which is the reason why they were selected for better petrological and geochronological studies.

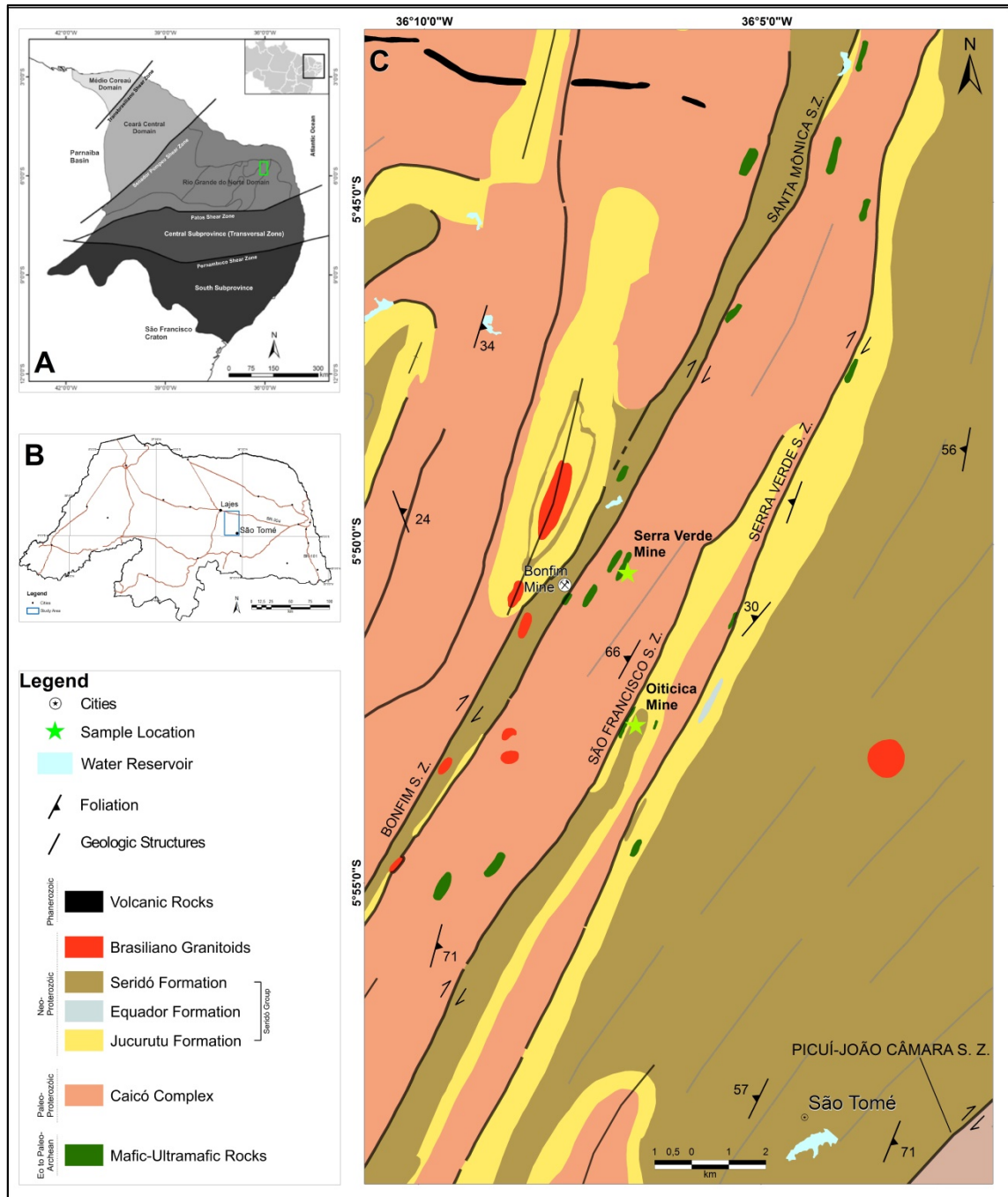


Figure 2 – A: Study area presented in green rectangle on Borborema Province context. Modified from Jesus (2011). B: Study area in Rio Grande do Norte state with the location of Lajes and São Tomé cities. C: Geological map of study area.

4. Materials and Methods

A total of 18 chemical analyzes were carried out for metamafic-ultramafic rocks at the Acme Labs™ (Vancouver, Canada) on two distinct types: 4A and 4B. Analysis type 4A is a whole rock analysis, where the major oxides and several minor elements have their content measured from 0.2 grams of a sample, which is analyzed by

Inductively Coupled Plasma - Emission Spectrometry (ICP-ES). This portion of the sample is then melted into lithium metaborate/tetraborate, and then diluted in a nitric digestion. Then the loss on ignition (LOI) is measured by the difference between the weights of this sample before and after it is burned at a temperature of 1000 ° C. Type 4B is a complement to 4A, where the compositions of rare earth and refractory elements are determined by ICP - Mass Spectrometry (ICP-MS).

The samples selected for isotopic analysis were processed in the mineral processing laboratory of the Federal University of Rio Grande do Norte, where the zircon grains were separated by crushing, sieving, grinding, magnetic separation by electromagnet and mechanical concentration by panning. The geochronological data were obtained by the Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP) U-Pb method on zircon grains, at the High Resolution Geochronology Laboratory, Institute of Geosciences, University of São Paulo, Brazil (see details in SATO et al., 2014). Analytical data are listed in tables 2 and 3.

5. Results

5.1 Field Characteristics and Petrography

The metamafic-ultramafic rocks (serpentinites, tremolite-actinolite schists and amphibolites) objects of this study (Figure 2) were thought to be part of Caicó Complex until recently.

The serpentinites occur as small elongated bodies in the central-north part of the studied area in contact with paragneisses (Jucurutu Formation) and biotite gneisses from the basement. Serpentinites can also occur as rounded metric-thick enclaves in gneisses, as observed in an old scheelite exploration trench and in the emerald mine (green stars in Figure 2). The serpentinites are medium- to coarse-grained rocks, sometimes showing up to 1 cm-long elongated crystals. Usually they show greenish color when unaltered due to the large amount of serpentine. Serpentine is the major phase (75-99%), occurring replacing the primary ferromagnesian minerals of the protolith and showing inclusions of opaque minerals. Chlorite (<2%), tremolite (<2%), carbonate (20-25%) and opaque minerals (1-5%) are also present. These phases occur as xenoblastic crystals, either showing irregular contacts with serpentine or filling fractures in the rock (Figures 3 A and B).

The amphibole schists are usually whitish, greyish or greenish, depending on the dominant mineral, tremolite or actinolite; when talc is present, the schist is grayish.

These rocks are medium- to coarse-grained, rare radial arrangements, and exhibit a foliation defined by the amphibole grains (Figures 3 C and D). Most of the samples described show a predominant composition of tremolite-actinolite schist. The main minerals are tremolite-actinolite (60-99%), chlorite (10-20%) and talc (5-50%), together with beryl (0-5%), opaque minerals (<2%), zoisite <2%), carbonates (<2%) and zircon (<1%) as mineral accessories.

The amphibolites occur in hectometric ellipsoidal lenses presenting medium-grained texture, dark green color and well-defined foliation planes formed by oriented amphibole and radial arrangements are also observed. These rocks are composed of tremolite-actinolite or hornblende (99%) as major phases, and opaque minerals (1%). Tremolite is millimetric, xenoblastic to hipidioblastic, and is slightly oriented according to the foliation (Figures 3 E and F).

5.2 Whole-rock Geochemistry

The three analyzed rock types have low values of SiO_2 ranging from 35.72 to 54.33 wt.%, high MgO (17.25-34.63 wt.%) and Fe_2O_3 (4.22 to 13.71 wt.%), confirming their basic to ultrabasic composition and mafic-ultramafic signature. The MgO (17.25-34.63 wt.%) show negative correlation with SiO_2 (35.72-54.33 wt.%), Al_2O_3 (1.04-8.29 wt.%), CaO (0.02-12.16 wt.%), K_2O (0.01-3.33 wt.%) and Na_2O (0.03-0.77 wt.%). Loss on ignition (12.4-16.9 wt.%) present strong positive correlation and high values, reflecting presence of serpentine and suggestive of hydrothermal alteration (Fig. 4).

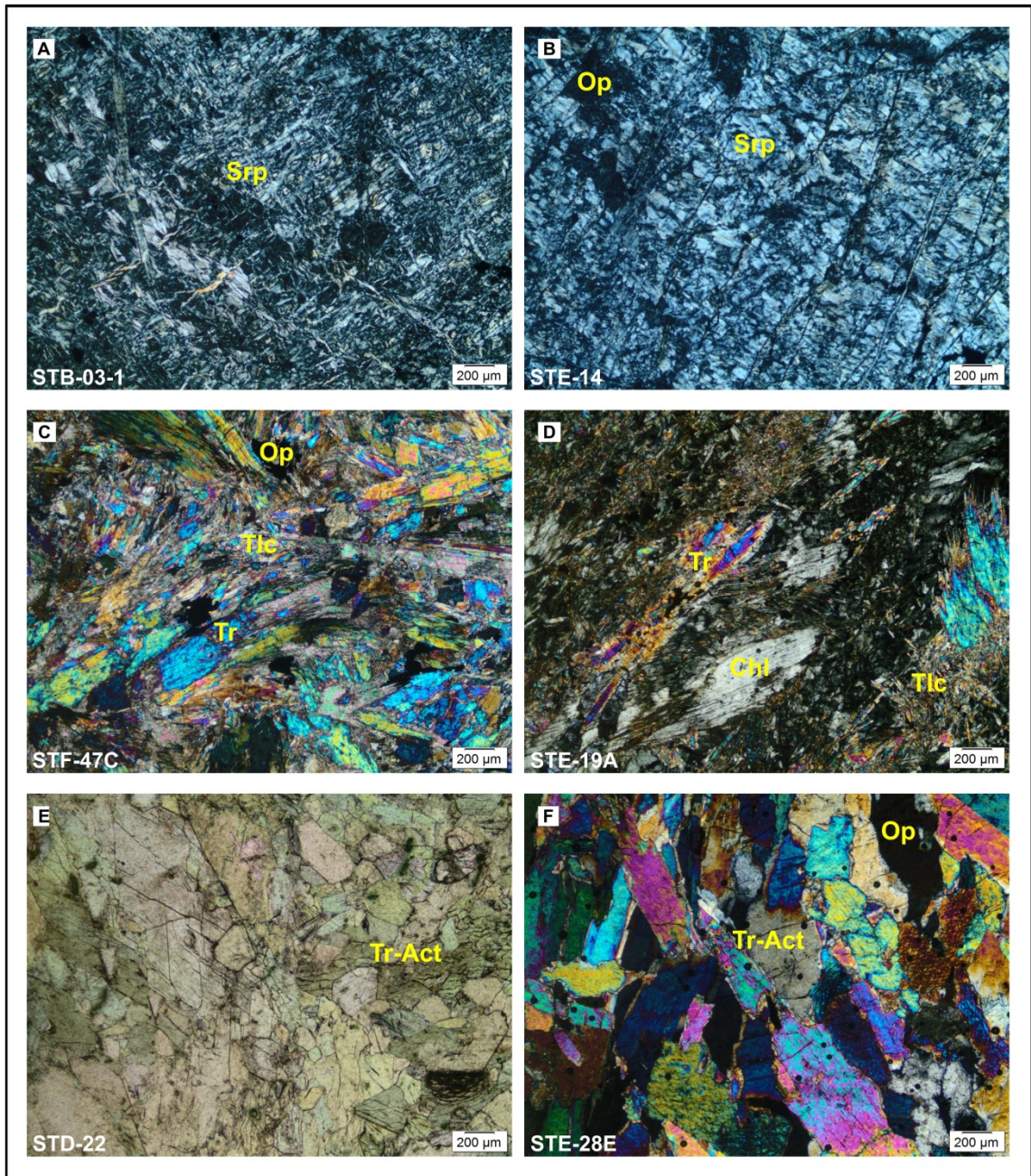


Figure 3 - Photomicrography of metamafic-ultramafic lithotypes of the study area. A-B: Typical serpentinite alteration. C: Talc-Tremolite Schist. D: Talc-Chlorite-Tremolite schist. E-F: Amphibolites. Srp = Serpentine, Tlc = Talc, Tr = Tremolite, Tr-Act = Tremolite-Actinolite, Op = Opaque minerals.

The TiO_2 (0.02-0.94 wt.%) shows negative correlation and Cr_2O_3 (0.08-1.64 wt.%) present positive correlation when compared to MgO. The positive correlation with MgO and the high values of Ni (307-4623 ppm) present in the studied rocks is compatible with others Archean High-Mg rocks according to Arndt (1991) (Fig. 5).

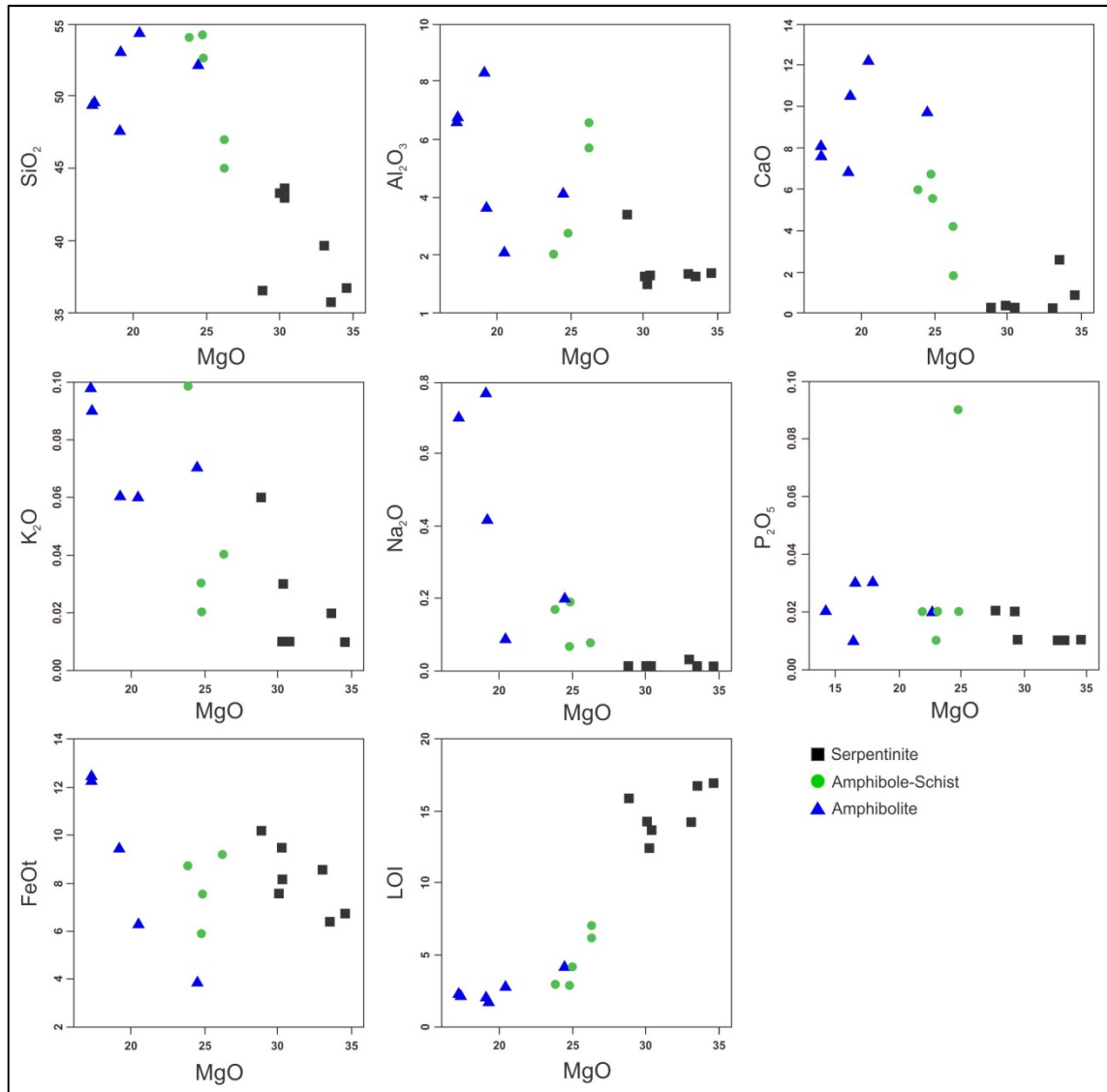


Figure 4 – Variation diagrams of major elements oxides vs. MgO as differentiation index for studied rocks.

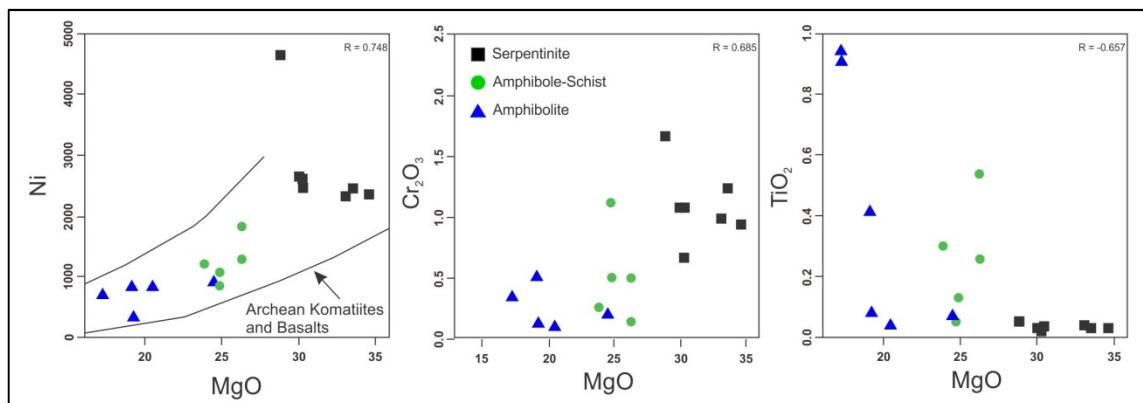


Figure 5 – Variation diagrams of MgO v.s. Ni, Cr₂O₃ and TiO₂ for studied rocks. The lines delimiting a space for Archean mafic-ultramafic rocks is from Arndt (1991).

It is observed two linear trends with slopes around 1:4 and 1:2 in terms of MgO/SiO_2 with minor scattering from the origin (Fig. 6), suggesting that olivine and probably orthopyroxene constituted a fundamental fractionating phase in these rocks.

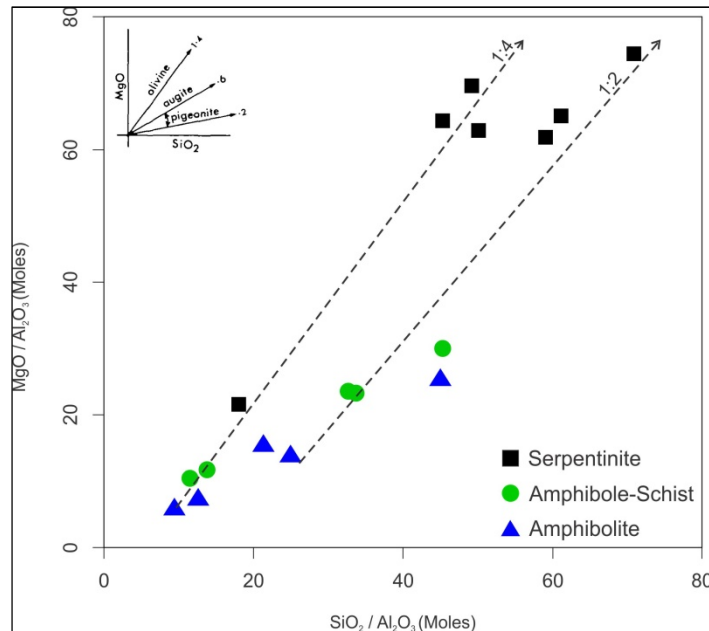


Figure 6 – $\text{MgO} / \text{Al}_2\text{O}_3$ versus $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram (molecular proportion ratio) for studied rocks, proposed by (Pearce, 1968; 1970). Arrows indicate trends for fractionation of analyzed samples.

The ternary diagrams of Viljoen (1982) and Jensen (1976) illustrates the strong magnesian character of the analyzed rocks when related with others major elements (Al, Fe and Ca) (Fig.7 A and B). According to these authors, this strong magnesian signature of the serpentinites and amphibolite-schists is typical of komatiite. The Mg contents of the amphibolites are similar to those of komatiitic basalt.

Primitive mantle-normalized trace elements patterns show enrichment in these elements increasing from serpentinites to amphibole-schists / amphibolites (Fig. 8). The serpentinites present a slight fractionation pattern in Large Ion Lithophiles Elements (LILE) become more flattened in HFSE. They present strong positive peaks of U and Pb and weak negative depletions in Sr and Ti. The amphibole-schists presents down concavity, enrichment in LILE, with HFSE values close to the primitive mantle and show negative peaks of Sr, Zr and Ti. The amphibolites exhibit a discrepant behavior on the mobile elements (LILE), negative peaks of Sr, Zr and Ti, and a flat pattern to Dy, Y, Yb and Lu. A discrete fractionation and enrichment occur in almost all elements when compared with the primitive mantle.

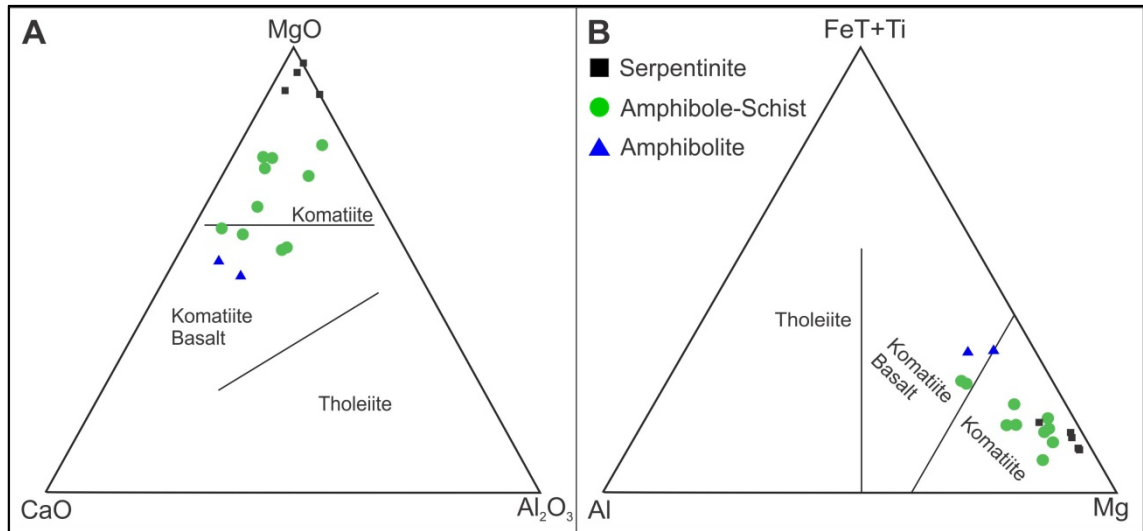
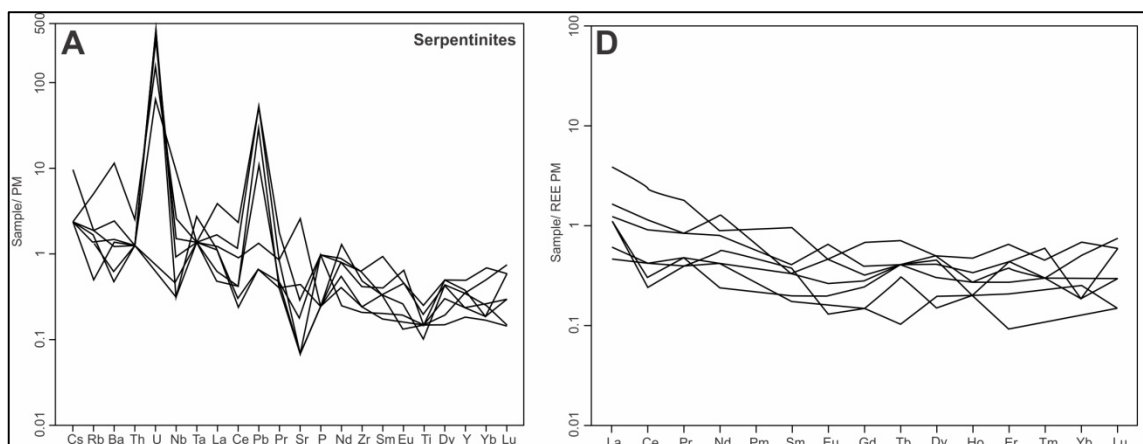


Figure 7 – A - MgO-CaO-Al₂O₃ triangular diagram for classification with fields proposed by Viljoen (1982). B - FeT+Ti-Al-Mg triangular diagram for classification with fields proposed by Jensen (1976).

REE primitive mantle-normalized patterns (Fig. 8) show that all rock types has light-REE (LREE) enrichment, whereas serpentinites and amphibole schists are slightly depleted in these elements while amphibolites is more enriched present a flat pattern. In Heavy-REE (HREE), these enrichment also increase related with the MgO content (Serpentinities < Amphibole-schists < Amphibolites), but the fractionation is not strong. Some samples of amphibole-schists and amphibolites shows Eu anomaly. In summary, the serpentinites are depleted in HREE compared to primitive mantle, shows slight fractionation of LREE in relation to HREE, and in general, have a lower total REE. Amphibolite schist has also slight fractionation LREE with respect to HREE, and higher total REE. Amphibolite has flat REE standards, but a much higher values compared to primitive mantle.



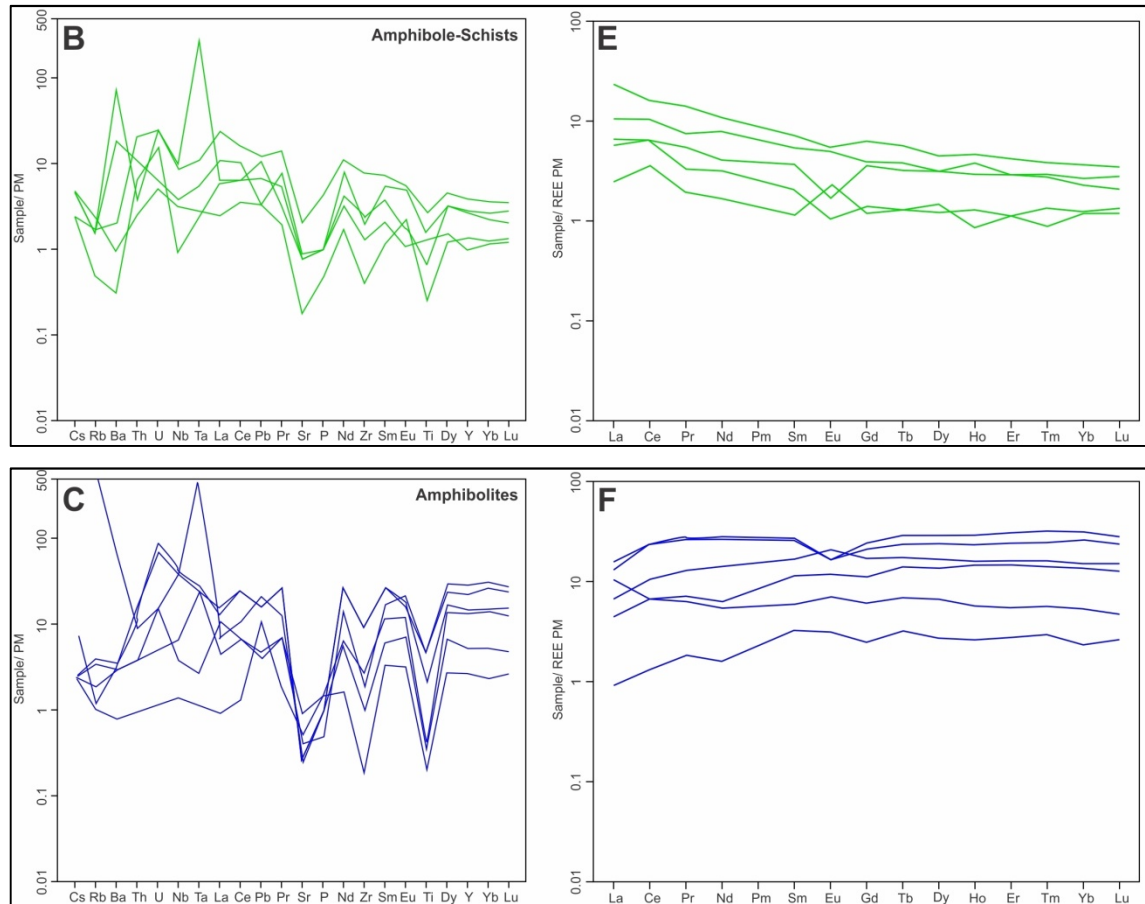


Figure 8 – A, B, C: Trace elements Primitive mantle normalized (McDonough and Sun, 1995) patterns of the studied rocks. D, E, F: REE Primitive mantle normalized (McDonough and Sun, 1995) patterns of the studied rocks.

5.3 Geochronology

There were analyzed 14 zircon grains extracted from a serpentinite sample of the Serra Verde Emerald Mine and 58 zircon grains recovered from the serpentinites of the Oiticica Mine.

In the Serra Verde Emerald Mine, the analyzed zircon crystals are rounded prismatic, subhedral, not fractured and have a size ranging from 120x50 μm to 150x200 μm . Cathodoluminescence images show clear differences between cores and rims, revealing concentric zoning in zircon grains that correspond to original crystallization in the center with post-crystallization growing edges (Fig. 9 A).

In the Oiticica Mine zircon grains are rounded prismatic, euhedral to subhedral, with some fractures, sometimes fragmented and have a size ranging from 140x70 μm to 33000x8000 μm . Cathodoluminescence images also show original crystallization in the center with post-crystallization growing edges (Fig. 10 A).

The age obtained from Serra Verde zircon grains is 3526 ± 5.0 Ma (MSWD = 0.0084) (Fig. 9 B), was provided by $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ weighted mean age obtained from three concordant grains, which can be interpreted as crystallization age of the serpentinite protolith. A lower intercept indicates an age of 562 ± 49 Ma (MSWD = 4.4) that is interpreted as an influence of Brasiliano-age event that affected all country rocks nearby.

Zircon grains exhibit magmatic cores with Th/U ratios ranging 0.24 to 0.84 and overgrowths with values between 0.02-0.14. Th/U values ranging 0.3 to 0.7 are considered from igneous zircons (WILLIAMS et al., 1996; RUBATTO; GEBAUER, 2000) and very low (< 0.1) means metamorphic overprint (WILLIAMS; CLAEISSON, 1987; RUBATTO; GEBAUER, 2000; RUBATTO, 2002).

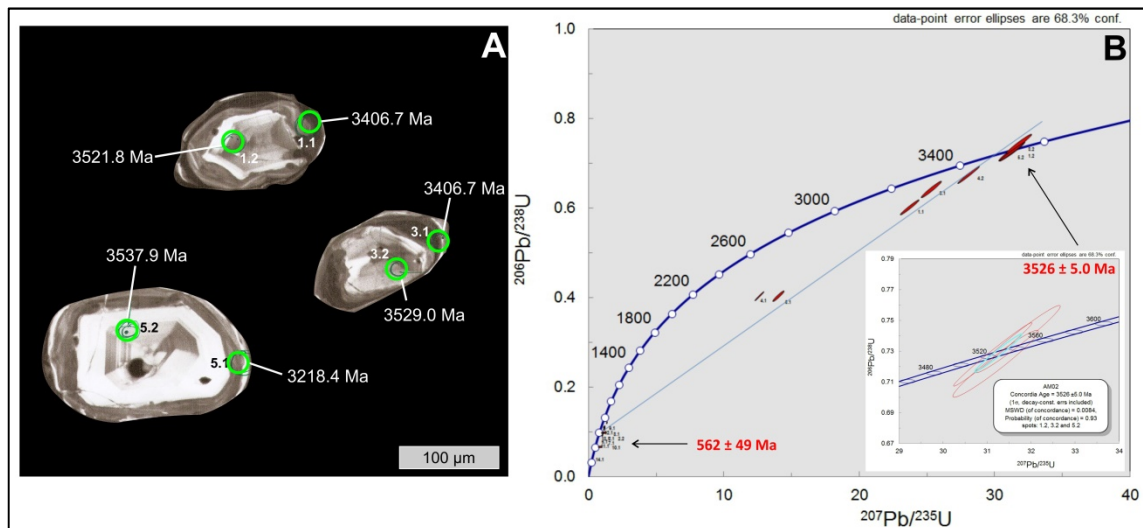


Figure 9 – A: Cathodoluminescence images of representative zircon grains from Serra Verde Mine. Circles denote the analytical spots. B: Geochronological U-Pb SHRIMP data in Concordia curve. Data from Table 2.

The Oiticica Mine zircon grains presented many populations in concordant to slight discordant data. The upper intercept data show an age of 3747 ± 12 Ma (MSWD = 9.8) (Fig. 10 B), which can be interpreted as primary crystallization.

The Th/U ratios are between 0.05 to 1.09, with magmatic cores showing Th/U ratios ranging 0.32 to 1.09 and metamorphic interference with values between 0.05 and 0.25.

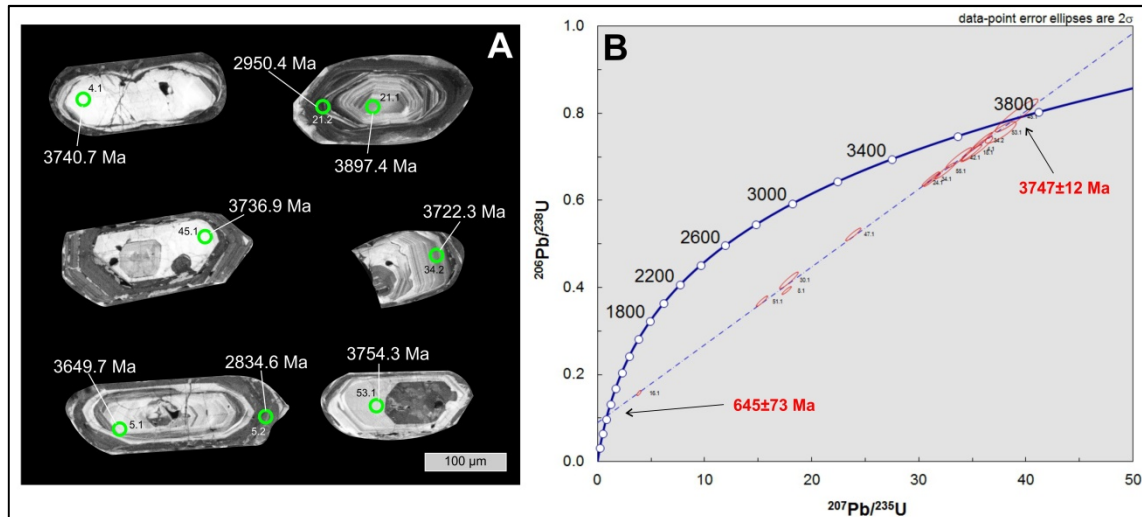


Figure 10 – A: Cathodoluminescence images of representative zircon grains from Oiticica Mine. Circles denote the analytical spots. B: Geochronological U-Pb SHRIMP data in Concordia curve. Data summarized on Table 3.

6. Discussion

6.1 Metamorphic and Metasomatic Influence

The variation diagrams for major elements using MgO as the differentiation index show the samples somewhat dispersed scattering (Fig.4) due to the redistribution of the original chemical composition through which these rocks were submitted due to the processes of metassomatism and metamorphism.

However, during alteration by hydrothermal events and/or regional metamorphism, as well as weathering, Ni is relatively immobile (Rollinson, 1993). The high Ni (307-4623 ppm) and MgO (17.25-34.63 wt.%) contents in the amphibolites, schists, and serpentinites coupled with the positive correlation of Ni and Cr_2O_3 with MgO, suggests a strong affinity of these rocks with others Archean mafic-ultramafic rocks.

The petrographic terms identified characterized by tremolitite (amphibolite), chlorite-talc schists and the serpentinite, suggest a metasomatic zoning by hydrothermal alteration. The fluid phases of K-P- H_2O -Ca-Na with ages between 517 and 596 Ma ($^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ in phlogopite crystal) and H_2O -NaCl- CH_4 - CO_2 of ages ranging from 442 to 554 Ma ($^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ in phlogopite crystal) are already reported in the area. These remobilizations generated the precipitation/crystallization of Ilmenite (up to 37 wt.% TiO_2) and Phlogopite (up to 2.87 wt.% TiO_2) in the São Tomé intrusion and the crystallization of the emeralds (<1.70 wt.% Cr_2O_3) near the phlogopite levels of the Serra Verde Mine (Ruiz et al., 2018; Santiago, 2017; Santiago et al., 2018).

Table 1 - Representative chemical composition for the studied metamafic-ultramafic rocks.

	Serpentinites							Amphibole-Schists					Amphibolites					
	AM-7C	STB-03-1	STB-03C	STB-03D	STC-14C2	STE-14	STE-14B	AM-1A	AM-5C	STD-20	STE-19A	STF-47C	STB-03A	STD-22	STD-60-1	STD-60A	STE-18	STE-28E
SiO ₂ (wt.%)	36.69	43.48	35.72	43.25	36.53	39.62	42.95	46.94	54.08	54.13	44.95	52.63	54.33	52.98	49.50	49.40	47.55	52.06
MgO	34.63	30.27	33.59	30.12	28.88	33.10	30.36	26.27	23.91	24.77	26.26	24.83	20.48	19.24	17.31	17.25	19.14	24.51
Al ₂ O ₃	1.37	1.04	1.23	1.24	3.42	1.34	1.19	5.71	2.02	2.73	6.55	2.72	2.05	3.60	6.72	6.56	8.29	4.12
Cr ₂ O ₃	0.92	0.65	1.22	1.06	1.64	0.97	1.06	0.48	0.25	1.10	0.12	0.48	0.08	0.11	0.32	0.32	0.48	0.18
Fe ₂ O ₃	7.46	10.46	7.08	8.39	11.29	9.44	9.05	10.17	9.61	6.53	10.19	8.39	6.99	10.41	13.71	13.47	10.39	4.22
K ₂ O	0.01	0.03	0.02	0.01	0.06	0.20	0.01	0.04	0.10	0.03	0.04	0.02	0.06	0.06	0.09	0.10	3.33	0.07
Na ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.08	0.17	0.19	0.08	0.07	0.09	0.42	0.70	0.70	0.77	0.20
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.09	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02
MnO	0.11	0.09	0.11	0.07	0.22	0.13	0.13	0.22	0.17	0.19	0.13	0.18	0.29	0.24	0.28	0.26	0.17	0.11
TiO ₂	0.03	0.02	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.26	0.30	0.05	0.54	0.13	0.04	0.08	0.94	0.91	0.41	0.07
LOI	16.90	12.40	16.70	14.20	15.90	14.20	13.60	7.00	2.90	2.90	6.20	4.20	2.80	1.90	2.20	2.30	2.00	4.20
Sum	99.22	98.81	98.55	98.75	98.66	99.38	98.75	99.15	99.57	99.40	99.51	99.34	99.50	99.54	99.49	99.50	99.43	99.55
Ba (ppm)	9.00	4.00	16.00	3.00	74.00	8.00	10.00	465.00	119.00	6.00	13.00	2.00	5.00	20.00	23.00	19.00	456.00	19.00
Co	112.10	195.60	112.90	128.40	193.30	130.00	192.80	90.00	94.90	72.60	91.60	65.70	59.10	80.20	107.70	106.70	75.50	52.20
Cs	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	88.20	0.20
Cu	5.90	2.40	12.90	2.60	8.10	12.80	2.50	32.70	40.60	8.20	46.60	20.20	14.50	2.10	2.40	2.30	1.30	6.40
Ga	1.40	2.50	1.80	2.40	4.00	3.80	2.40	7.30	4.30	4.20	8.80	4.50	5.70	7.10	15.70	15.40	26.80	6.20
Hf	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.60	0.20	2.40	0.70	0.10	0.20	3.10	3.10	1.20	0.60
Nb	0.30	0.20	0.10	0.20	1.70	1.00	0.60	6.40	2.50	2.10	5.60	0.60	0.90	2.50	28.50	25.60	25.70	4.30
Ni	2346.00	2606.00	2426.00	2636.00	4623.00	2310.00	2481.00	1268.00	1191.00	1030.00	1820.00	827.00	830.00	307.00	673.00	669.00	816.00	889.00
Pb	4.30	1.60	7.70	0.10	7.60	0.20	0.10	1.60	0.50	0.50	1.80	1.00	1.60	0.70	2.50	2.40	3.10	0.60
Rb	0.30	0.80	1.10	1.00	3.00	1.10	0.80	0.90	1.00	1.40	1.00	0.30	0.60	1.10	2.40	2.10	380.50	0.70
Sc	5.00	6.00	4.00	5.00	8.00	6.00	4.00	10.00	16.00	9.00	14.00	12.00	3.00	18.00	36.00	33.00	29.00	10.00
Sr	8.80	3.50	50.70	1.40	5.70	1.30	1.40	14.40	15.20	3.50	40.30	16.70	10.20	17.40	5.30	4.80	7.90	20.60
Ta	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	9.80	0.20	0.10	0.40	0.10	0.10	0.10	1.00	0.90	79.50	1.00
Th	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.20	0.20	1.60	0.50	0.20	0.30	0.90	1.20	0.70	0.20
U	0.10	0.10	1.30	10.30	3.00	6.20	10.50	0.50	0.10	0.10	0.50	0.30	0.10	0.30	1.80	1.40	0.30	0.10
V	11.00	51.00	47.00	41.00	56.00	59.00	33.00	61.00	77.00	58.00	128.00	78.00	47.00	105.00	204.00	195.00	138.00	27.00
Y	0.80	1.40	1.00	1.60	2.10	1.00	1.50	4.20	11.10	5.90	16.60	11.70	11.40	22.10	119.50	95.00	62.90	57.20
Zn	7.00	12.00	11.00	23.00	25.00	36.00	24.00	24.00	7.00	4.00	18.00	17.00	7.00	10.00	10.00	11.00	54.00	10.00
Zr	2.40	6.10	4.30	2.20	6.30	5.00	2.50	13.30	21.00	4.10	79.70	23.80	1.90	9.90	96.30	93.50	19.60	28.00
La (ppm)	0.30	0.40	1.10	0.70	2.50	0.80	0.70	3.70	6.90	1.60	15.10	4.10	0.60	6.90	8.50	10.20	4.30	2.90
Ce	0.70	0.70	1.90	0.50	3.90	1.50	0.40	10.60	17.40	5.90	27.00	10.50	2.20	11.30	39.80	40.80	17.70	11.00
Pr	0.10	0.12	0.21	0.12	0.45	0.22	0.10	0.83	1.92	0.49	3.52	1.38	0.47	1.66	6.75	6.84	3.28	1.81
Nd	0.70	0.30	1.00	0.30	1.10	1.60	0.50	3.90	9.80	2.10	13.50	5.10	2.00	6.90	33.40	34.90	17.60	8.00
Sm	0.15	0.13	0.16	0.08	0.38	0.13	0.07	0.82	2.17	0.46	2.90	1.49	1.33	2.37	11.25	10.71	6.86	4.66
Eu	0.02	0.04	0.10	0.03	0.07	0.07	0.02	0.16	0.76	0.34	0.84	0.26	0.48	1.09	2.55	2.66	3.24	1.85
Gd	0.08	0.15	0.21	0.13	0.37	0.17	0.08	0.74	2.13	0.67	3.41	1.95	1.33	3.32	13.29	11.65	9.38	6.21
Tb	0.03	0.04	0.04	0.04	0.07	0.04	0.01	0.13	0.38	0.13	0.56	0.32	0.31	0.69	2.92	2.35	1.75	1.40
Dy	0.10	0.31	0.20	0.34	0.33	0.28	0.13	1.00	2.10	0.81	3.03	2.14	1.85	4.51	19.52	16.10	11.27	9.19
Ho	0.03	0.03	0.04	0.04	0.07	0.05	0.02	0.13	0.56	0.19	0.68	0.43	0.39	0.85	4.33	3.52	2.39	2.21
Er	0.04	0.20	0.12	0.16	0.29	0.18	0.09	0.48	1.30	0.48	1.83	1.28	1.24	2.39	13.55	10.53	6.99	6.54
Yb	0.05	0.22	0.05	0.08	0.30	0.08	0.11	0.52	0.98	0.54	1.60	1.15	1.02	2.37	13.88	11.56	6.60	6.13
Lu	0.01	0.05	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.08	0.14	0.09	0.24	0.19	0.18	0.32	1.93	1.61	1.03	0.87

Table 2 – U-Pb Isotopic data of serpentinite from the Serra Verde Mine.

Sample-Spot	Th/U	Measured Isotopic Ratios						Corrected ages (Ma)						U-Pb Disc (%)
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	% err	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	% err	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	% err	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ err	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ err	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ err	
Serpentinite (AM02)														
AM02-1.1	0.43	0.2915	0.3	1.8012	0.8	0.1973	2.5	3406.7	6	2990.0	47	3327.8	89	13.5
AM02-2.1	0.03	0.0583	0.6	0.2576	1.2	0.0320	3.1	516.9	17	524.8	9	543.2	46	-1.5
AM02-3.1	0.24	0.2887	0.4	1.7392	1.5	0.1748	2.8	3406.7	7	3165.9	50	3132.3	118	7.7
AM02-4.1	0.03	0.2293	0.3	0.9222	0.7	0.1490	2.8	3044.5	5	2122.5	34	2546.6	120	43.3
AM02-5.1	0.20	0.2561	0.6	1.2922	1.1	0.1699	2.7	3218.4	10	2099.8	37	3078.5	101	51.7
AM02-6.1	0.09	0.0798	0.5	0.2548	0.9	0.0545	2.4	546.5	123	565.0	11			-1.8
AM02-7.1	0.03	0.0586	0.5	0.2552	1.3	0.0277	3.1	540.9	13	534.2	9	503.5	33	1.3
AM02-8.1	0.13	0.1293	0.7	0.2370	1.7	0.1120	2.2	722.2	368	493.1	10			49.6
AM02-9.1	0.02	0.0706	0.6	0.2396	1.7	0.1127	2.9	771.6	35	620.2	11	335.6	278	24.6
AM02-10.1	0.02	0.0649	0.6	0.2600	1.0	0.0684	2.9	560.7	42	550.3	10			2.2
AM02-11.1	0.02	0.0675	0.5	0.2024	0.9	0.0983	2.5	608.7	47	447.1	8	609.2	186	36.0
AM02-12.1	0.03	0.0610	0.6	0.3000	0.8	0.0386	3.2	554.7	27	555.2	10	438.8	77	0.0
AM02-13.1	0.09	0.0674	0.6	0.1857	0.3	0.0272	2.6	526.9	62	483.7	9	102.7	58	10.1
AM02-14.1	0.14	0.1461	1.2	0.1374	0.4	0.0789	3.3	755.1	447	289.9	7			166.7
AM02-5.2	0.75	0.3138	0.5	1.9554	0.8	0.1916	2.3	3537.9	8	3502.1	58	3521.7	83	1.0
AM02-3.2	0.71	0.3123	0.4	2.1387	1.1	0.1941	2.2	3529.0	7	3565.3	57	3534.7	77	-0.9
AM02-4.2	0.84	0.3041	0.3	1.5589	0.4	0.1929	2.1	3490.2	5	3273.1	54	3556.9	72	6.0
AM02-1.2	1.11	0.3104	0.3	1.9690	1.7	0.1899	1.9	3521.8	4	3528.0	56	3503.6	68	-0.1
AM02-2.2	0.06	0.0812	0.4	0.2713	2.4	0.0771	2.6	700.2	96	527.1	10	153.9	152	33.7

Table 3 – U-Pb Isotopic data of serpentinite from the Oiticica Mine.

Sample-Spot	Th/U	Measured Isotopic Ratios						Corrected ages (Ma)						U-Pb Disc (%)
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	% err	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	% err	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	% err	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ err	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ err	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ err	
Serpentinite (MOP)														
MOP-4.1	0.45	0.3614	0.5	2.1150	2.3	0.2132	2.5	3740.7	9	3483.2	46	3587.2	109	8.8
MOP-5.1	0.47	0.3394	0.4	1.9029	1.9	0.1970	1.7	3649.7	6	3433.2	33	3448.7	64	7.6
MOP-5.2	0.05	0.2263	0.4	0.5509	3.2	4.0250	1.2	2834.6	13	1315.5	16	30608.6	225	45.2
MOP-7.1	1.01	0.2857	0.3	1.1997	2.2	0.1268	1.2	3371.6	6	2432.8	22	2309.4	28	33.7
MOP-7.2	0.76	0.3001	0.3	1.4107	3.0	0.1550	1.4	3454.5	6	2637.4	25	2797.6	40	28.3
MOP-8.1	0.40	0.3352	0.3	1.1402	2.7	0.1724	1.3	3598.5	6	2110.8	18	2667.7	52	47.4
MOP-9.1	0.33	0.2690	0.3	1.4140	2.8	0.1438	2.0	3295.5	5	2664.4	22	2649.8	52	23.3
MOP-10.1	0.69	0.3075	0.3	1.9324	2.0	0.1853	1.4	3501.4	5	3152.7	29	3369.6	44	12.1
MOP-17.1	0.11	0.2964	0.3	1.6504	1.9	0.1719	2.2	3442.6	5	2911.7	24	2715.3	109	19.2
MOP-18.1	0.59	0.3580	0.3	1.8899	2.3	0.1827	2.0	3738.7	5	3462.6	30	3348.8	62	9.7
MOP-19.1	0.75	0.2952	0.3	1.1326	2.3	0.1580	1.3	3437.9	5	2581.3	23	2914.6	36	29.2
MOP-20.1	0.47	0.1395	0.5	1.0308	2.5	0.1183	1.6	2186.6	12	2136.1	20	2155.6	39	2.7
MOP-20.2	0.31	0.1364	0.5	1.1839	2.3	0.1175	1.8	2141.0	12	2125.1	20	2059.1	50	1.0
MOP-21.1	0.51	0.3978	0.4	1.8023	3.0	0.1939	1.3	3897.4	6	3448.7	27	3509.8	43	14.7
MOP-21.2	0.07	0.2191	0.2	0.8242	3.8	0.1300	2.1	2950.4	4	1774.3	13	1698.1	81	45.4
MOP-33.1	0.67	0.3059	0.3	1.6798	1.5	0.1729	1.4	3491.8	5	3209.1	28	3140.5	42	10.4
MOP-34.1	0.69	0.3481	0.3	1.7970	2.5	0.1672	1.4	3695.8	4	3236.0	28	3088.6	41	16.1
MOP-34.2	0.44	0.3543	0.2	2.0150	1.7	0.1963	1.3	3722.3	4	3564.3	28	3549.7	46	5.5
MOP-42.1	0.57	0.3544	0.4	2.0913	2.0	0.2036	1.9	3711.2	7	3405.8	39	3519.1	75	10.4
MOP-45.1	0.41	0.3593	0.7	2.1043	2.2	0.2513	3.1	3736.9	11	3752.1	59	4209.7	155	-1.2
MOP-46.1	0.72	0.3300	0.3	1.7162	2.2	0.1822	1.6	3610.4	5	3094.7	28	3315.4	50	17.4
MOP-47.1	0.43	0.3346	0.4	1.5215	2.2	0.1982	2.0	3626.0	6	2669.2	27	3477.5	73	30.9
MOP-53.1	0.53	0.3639	0.8	2.0507	0.7	0.2096	1.9	3754.3	13	3631.4	39	3617.8	77	4.3
MOP-54.1	0.62	0.3350	0.4	2.1385	1.4	0.1918	1.6	3634.2	6	3503.5	34	3465.4	55	4.7
MOP-54.2	0.41	0.2618	0.2	1.0984	4.3	0.1182	1.6	3250.5	4	2554.4	30	2184.9	36	26.4
MOP-55.1	0.68	0.3542	0.3	1.8365	1.5	0.1873	1.5	3718.1	6	3292.5	32	3378.5	51	14.4
MOP-56.1	0.24	0.3627	0.3	1.1223	2.0	0.1671	1.5	3754.2	5	2168.7	18	2948.6	52	48.8
MOP-57.1	0.78	0.3094	0.3	1.7906	1.3	0.1864	1.3	3511.4	5	3378.8	30	3396.3	42	4.8
MOP-58.1	0.30	0.3332	0.4	1.7579	1.6	0.2060	3.6	3622.7	6	3300.3	32	3551.8	127	11.1
MOP-58.2	0.24	0.3689	0.3	1.5773	1.4	0.1799	1.5	3783.3	4	3113.6	25	3214.5	53	22.2

This mineralogy explains the relatively lower contents than expected of Ti and Cr in the studied rocks. Several granite bodies intruded between 575-635 Ma (NASCIMENTO et al., 2015) generating medium-grade contact metamorphism attributed to the medium amphibolite facies, which fluids were channeled by the expressive shear zones that functioned as conduits for the circulation of these fluids.

In Figure 6 we can see that despite the strong influence of metasomatic/metamorphic processes, the studied rocks did not change much their initial compositions.

6.2 Chemical Composition: Komatiite as protolith?

Chemically, the rocks studied have many parameters to be classified as komatiites. According to Viljoen (1969), Jensen (1976) and Le Bas (2000) such as contents of MgO > 18 wt.%, SiO₂ ranging 35 to 54 wt.%, Na₂O+K₂O < 2 wt.%, TiO₂ < 1 wt.%, high Ni (307-4623 ppm) and Cr₂O₃ (0.08-1.64 wt.%) values. An important characteristic to designate a rock as a komatiite is the presence of spinifex texture (in field and/or thin sections), but it is expected that primary features were not preserved in rocks that passed for at least three cycles of metamorphism (Mesoarchean, Paleoproterozoic, Late Neoproterozoic) as revealed by the geochronological data and well documented in literature (DANTAS et al., 2004, 2013; SOUZA et al., 2007, 2015; NASCIMENTO et al., 2015).

When we are dealing with basic to ultrabasic composition is expected that olivine and/or orthopyroxene are the major phases in the fractional crystallization. So that, the figure 6 indicate that mineralogy was involved and corroborates with the idea that komatiite could be the protolith.

6.3 Geochronology and Geotectonic model: Eo to Paleoarchean rocks in BP

The Archean record in South American platform is limited to small nuclei sparse on the continent. Until now, the oldest rocks are dated with 3.4/3.5 Ga in the São Francisco Craton and Borborema Province with some model ages a little bit older (Martin et al., 1991; 1997; Dantas et al., 2004). Besides that, only two detritic zircon grains with Hadean ages were found in Guiana shield (4219 ± 19 Ma) and São Francisco Craton (4096 ± 23 Ma) (NADEAU et al., 2013; PAQUETTE et al., 2015).

The Archean period in the RGND is characterized by a complex magmatic and deformational history, involving several episodes of magmatic pulses ranging from 2.7 to 3.4 Ga into the crust from enriched mantle sources in a convergent environment (DANTAS et al., 2013; SOUZA et al., 2015). These episodes of magmatism were responsible for high temperature tectonometamorphic events that were printed in the older rocks and revealed in the zircon grains overgrowths (Figs. 8A and 9A).

After the 3.4 Ga orthogneisses of São José do Campestre Massif (DANTAS et al., 2004), Ruiz et al (2018) obtained a concordant age 3506 ± 20 Ma (LA-MC-ICPMS) in zircon of a hornblende-pyroxenite that represented the oldest Archean age determined for BP, but this study brings two new ages of 3526 ± 5.0 Ma and 3747 ± 12 Ma in serpentines which can be treated as the oldest rocks in South American Platform.

According to Dantas et al. (2004; 2013) and Souza et al. (2007; 2015), several pulses of magmatism took place at RGND and in BP beginning in 3.48 Ga and lasted 700 Ma, but these new data suggest that the magmatic activity started before 3.7 Ga. After a quiescent period, about 1 Ga, the Archean blocks were amalgamated during the Paleoproterozoic (NEVES 2003, 2011), and during the Neoproterozoic were affected by the regional metamorphism and the intrusion of several plutons (JARDIM DE SÁ et al. 1995; DELGADO et al. 2003).

The others Archean units of the RGND register Nd T_{DM} ages (3.11-4.09 Ga) much older than the crystallization ages and negative and/or positive epsilon Nd values (DANTAS et al., 2004; 2013; SOUZA et al., 2007; 2015), which may indicate recycling of older crustal fragments and the accretion of juvenile material, but the serpentinites dated in this study are the oldest rocks in South America so far, and it is unlikely that the zircon grain extracted from them comes from inherited xenocrystals, as there is nothing older on the entire continent.

Paleoarchean to Mesoarchean crust with slightly younger ages has already been identified in the Gavião Block of São Francisco Craton and part of its basement is composed by 3.4 Ga TTG associations and 3.2-2.9 Ga mafic-ultramafic rocks which are part of greenstone belts (MARTIN et al., 1997; BARBOSA AND SABATÉ, 2004). These ages and compositions are similar to found in the east part of RGND making this scenario likely to the study area, and suggesting the rocks studied here could be a part of a dismembered greenstone belt. The fact that the bodies of mafic-ultramafic

rocks studied in this research are located under strong influence of the Santa Monica, São Francisco and Serra Verde shear zones, gives them the possibility of an allochthonous character, and reinforces the idea of a dismembered nature.

7. Conclusion

Based on the presented investigation, our study of the meta mafic-ultramafic rocks from the central RGND indicates that:

- The analyzed rocks were divided in three types according to petrographic description. The Serpentinite has serpentine as the major phase, but chlorite, tremolite, calcite-dolomite and opaque minerals are also present. The amphibole schists have tremolite-actinolite, chlorite and talc as the main minerals and beryl, opaques, zoisite, carbonates and zircon as accessories. The amphibolites are composed of tremolite-actinolite or hornblende as main phases, and opaque minerals as accessories.
- Irrespective of the specific tectonic setting, it is clear that the Mg- and Ni-rich metamafic-ultramafic rocks are of mantle derivation and have strong affinities with komatiites, which support the inference that they were part of a greenstone belt.
- The ages of 3747 ± 12 Ma and 3526 ± 5.0 Ma (U-Pb in zircon) in serpentines point out as the oldest rock record (Eoarchean Era) in South American Platform and could be a part of a dismembered greenstone belt.

8. Acknowledgements

We thanks to CNPq that provided financial resources to fieldwork stages, chemical and isotopic analyses by the project number 1533695260888392 granted to MTOCN. The UFPE and IFRN also thanked for providing infrastructure and logistic help. F.G. Santos thanks to Geological Survey of Brazil – CPRM by the incentive in the search for Master degree in Geology.

9. References

- ALMEIDA, F. F. M.; LEONARDOS, O. H.; VALENÇA, J. Review on granitic rocks of Northeast South America. *In*: IUGS/UNESCO Symposium, 1967, Recife, 41 p.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. **Earth-Science Reviews**, [s.l.], v. 17, p.1-29, 1981.

- ANGELIM, L. A. A. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. **Petrolina. Folha SC24-V-C. Estados da Bahia, Pernambuco e Piauí.** Mapa Geológico. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 1997. 1 mapa colorido. Escala 1: 250.000.
- ANHAEUSSER, C. R. Archaean greenstone belts and associated granitic rocks – A review. **Journal of African Earth Sciences**, [s.l.], v. 100, p.684-732, dez. 2014.
- ARNDT, N. Komatiites, kimberlites, and boninites. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, [s.l.], v. 108, n. 6, p.1-11, jun. 2003.
- ARNDT, N. T.; JENNER, G. A. Crustally contaminated komatiites and basalts from Kambalda, Western Australia. **Chemical Geology**, [s.l.], v. 56, n. 3-4, p.229-255, out. 1986.
- ARNDT, N. T.; NISBET, E. G. What is a komatiite? In: ARNDT, N.T.; NISBET, E. G. **Komatiites**. Allen and Unwin, Concord Mass. 1982. p.19–28.
- ARNDT, N. T.; TEIXEIRA, N. A.; WHITE, W. M.. Bizarre geochemistry of komatiites from the Crixás greenstone belt, Brazil. **Contributions To Mineralogy And Petrology**, [s.l.], v. 101, n. 2, p.187-197, fev. 1989.
- ARNDT, N. T. High Ni in Archean Tholeiites. **Tectonophysics**, [s.l.], v. 187, n. 4, p.411-419, mar. 1991.
- ARNDT, N. T. Archean komatiites. In: CONDIE, K.C. (Ed.), **Archean Crustal Evolution**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 11–44.
- ARTHAUD, M. H.; CABY, R.; FUCK, R. A.; DANTAS, E. L.; PARENTE, C. V. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. Geological Society, London, **Special Publications**, [s.l.], v. 294, n. 1, p.49-67, jan. 2008.
- BARBOSA, J. S. F.; SABATÉ, P. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 133, n. 1-2, p.1-27, ago. 2004.
- BASTOS LEAL, L. R.; CUNHA, J. C.; CORDANI, U. G.; TEIXEIRA, W.; NUTMAN, A.; MENEZES LEAL, A. B.; MACAMBIRA, M. J. B. SHRIMP U–Pb, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Zircon Dating and Nd Isotopic Signature of the Umburanas Greenstone Belt, Northern São Francisco Craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 15, p.775-785, 2003.

- BICKLE, M. J.; MARTIN, A.; NISBET, E. G.; ORPHEN, J. L. **The geology of the Belingwe Greenstone Belt, Zimbabwe: a study of Archean continental crust.** Rotterdam: Geological Society of Zimbabwe Special Publications 2, 1983. 246.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: CORDANI, U.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Eds.). **Tectonic evolution of South America.** 31st International Geological Congress, 2000, Rio de Janeiro, p.151–182.
- CABY, R. Precambrian terranes of Benin-Nigeria and northeast Brazil and the Late Proterozoic South Atlantic fit. **Geological Society of America Special Papers**, [s.l.], v. 230, p.145-158, jan. 1989.
- CABY, R.; SIAL, A. N.; ARTHAUD, M.; VAUCHEZ, A. Crustal Evolution and the Brasiliano Orogeny in Northeast Brazil. **The West African Orogens and Circum-atlantic Correlatives**, [s.l.], p.373-397, jan. 1991.
- CAVALCANTE, R.; CUNHA, A. L. C.; OLIVEIRA, R. G.; MEDEIROS, V. C.; DANTAS, A. R.; COSTA, A. P.; LINS, C. A. C.; LARIZZATTI, J. H. Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: Área Seridó-Leste, Extremo Nordeste da Província Borborema (RN-PB): escala 1:250.000. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2016. 105p. Informe de Recursos Minerais. Série Províncias Minerais do Brasil, Nº 8.
- CAVALCANTE, R.; MEDEIROS, V. C.; COSTA, A. P.; SÁ, J. M.; SANTOS, R. V.; RODRIGUES, J. B.; DANTAS, A. R.; NASCIMENTO, M. A. L.; CUNHA, A. L. C. Neoarchean, Rhyacian and Neoproterozoic units of the Saquinho region, eastern Rio Piranhas-Seridó domain, Borborema Province (northeastern Brazil): implications for the stratigraphic model. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.11-29, abr. 2018.
- CRUZ, R. F., PIMENTEL, M. M., ACCIOLY, A. C. A., RODRIGUES, J. B. 2014. Geologic and Isotopic Characteristics of Granites from the Pernambuco-Alagoas Domain: Implications for the Crustal Evolution of the Neoproterozoic Borborema Province. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, n. 4, p.627-652, 2014.
- CUNHA, J. C.; BARBOSA, J. S. F.; MASCARENHAS, J. F. Greenstone Belts e Sequências Similares. In: BARBOSA, J. S. F. (Coord.). **Geologia da Bahia: Pesquisa e Atualização.** Salvador: CBPM, 2012. p. 203-326.

- DANTAS, E. L.; VAN SCHMUS, W. R.; HACKSPACKER, P. C.; FETTER, A. H.; BRITO NEVES, B. B.; CORDANI, U.; NUTMAN, A. P.; WILLIAMS, I. S. The 3.4–3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 130, n. 1-4, p.113-137, abr. 2004.
- DANTAS, E. L.; VAN SCHMUS, W. R.; HACKSPACKER, P. C.; FETTER, A. H.; BRITO NEVES, B. B.; CORDANI, U.; NUTMAN, A. P.; WILLIAMS, I. S. The 3.4–3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 130, n. 1-4, p.113-137, abr. 2004.
- DELGADO, I. M.; SOUZA, J. D.; SILVA, L. C.; SILVEIRA FILHO, N. C.; SANTOS, R. A.; PEDREIRA, A. J.; GUIMARÃES, J. T.; ANGELIM, L. A. A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; LACERDA FILHO, J. V.; VALENTE, C. R.; PERROTA, M. M.; HEINECK, C. A. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. p.227-334.
- DOSTAL, J. Komatiites. **Geoscience Canada**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.21-31, mar. 2008.
- DOSTAL, J.; MUELLER, W. U. 2004, Komatiite Geochemistry. In: ERIKSSON, P. G.; ALTERMANN, W.; NELSON, D. R.; MUELLER, W. U.; CATUNEANU, O. **The Precambrian Earth: Tempos and Events: Developments in Precambrian Geology**. 1. ed. v. 12. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 290-298.
- HERZBERG, C. Depth and degree of melting of komatiites. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v. 97, n. 4, p.4521-4540, 1992. American Geophysical Union (AGU).
- HERZBERG, C.; VIDITO, C.; STARKEY, N. A. Nickel–Cobalt Contents of Olivine Record Origins of Mantle Peridotite and Related Rocks. **American Mineralogist**, [s.l.], v. 101, n. 9, p.1952-1966, set. 2016.
- FAN, J.; KERRICH, R. Geochemical Characteristics of Aluminum Depleted and Undepleted Komatiites and HREE-enriched low-ti Tholeiites, Western Abitibi Greenstone Belt: A Heterogeneous Mantle Plume-Convergent Margin Environment. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, [s.l.], v. 61, n. 22, p.4723-4744, nov. 1997.

- GANADE, C. E., BASEI, M. A. S., GRANDJEAN, F. C., ARMSTRONG, R., BRITO, R. S. Contrasting Archaean (2.85–2.68 Ga) TTGs from the Tróia Massif (NE-Brazil) and Their Geodynamic Implications for Flat to Steep Subduction Transition. *Precambrian Research*, [s.l.], v. 297, p.1-18, 2017.
- HOLLANDA, M. H. B. M.; ARCHANJO, C. J.; BAUTISTA, J. R.; SOUZA, L. C. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. ***Precambrian Research***, [s.l.], v. 258, p.186-207, mar. 2015.
- JARDIM DE SÁ, E. F. **A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu Significado Geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan Africana**. 1994. 803 pp. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1994.
- JARDIM DE SÁ, E. F. Pre-Brasiliano Orogenic Evolution in the Serido Belt, NE Brazil; Conflicting Geochronological and Structural Data. ***Revista Brasileira de Geociências***, [s.l.], v. 25, n. 4, p.307-314, 1995.
- JENSEN, L. S. A New Cation Plot for Classifying Subalkaline Volcanic Rocks. Ontario Division of Mines, **Miscellaneous Paper**, [s.l.], v. 66, p. 1-30. 1976.
- JESUS, B. A. **Rochas Máficas e Ultramáficas do Complexo Riacho da Telha, Maciço São José do Campestre, Província Borborema – NE do Brasil**. 2011. 80p Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- KERR, A. C.; ARNDT, N. T. A Note on the IUGS Reclassification of the High-Mg and Picritic Volcanic Rocks. ***Journal of Petrology***, [s.l.], v. 42, n. 11, p.2169-2171, nov. 2001.
- LE BAS, M. J. IUGS Reclassification of the High-Mg and Picritic Volcanic Rocks. ***Journal of Petrology***, [s.l.], v. 41, n. 10, p.1467-1470, 1 out. 2000.
- LE MAITRE, R. W. *Igneous Rocks: A classification and glossary of terms*, second edition. 2002. Cambridge University Press, Cambridge, 236p.
- LEAL, A. B. M.; SANTOS, A. L. D.; BASTOS LEAL, L. R.; CUNHA, J. C. Geochemistry of Contaminated Komatiites from the Umburanas Greenstone Belt, Bahia State, Brazil. ***Journal of South American Earth Sciences***, [s.l.], v. 61, p.1-13, ago. 2015.

- LESHER, C. M.; ARNDT, N. T. REE and Nd Isotope Geochemistry, Petrogenesis And Volcanic Evolution of Contaminated Komatiites at Kambalda, Western Australia. **Lithos**, [s.l.], v. 34, n. 1-3, p.127-157, jan. 1995.
- LESHER, C. M.; LEE, R. F.; GROVES, D. I.; BICKLE, M. J. Geochemistry of komatiites from Kambalda, Western Australia; I, Chalcophile element depletion, a consequence of sulfide liquid separation from komatiitic magmas. **Economic Geology**, [s.l.], v. 76, n. 6, p.1714-1728, 1 out. 1981.
- LESHER, C. M.; ARNDT, N. T.; GOVES, D. I. Genesis of Komatiite-Associated Nickel Sulphide Deposits at Kambalda, Western Australia: A Distal Volcanic Model. *In*: BUCHANAN, D. L., JONES, M. J. (Eds). **Sulphide Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks**. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1984. p. 70-80.
- LIRA SANTOS, L. C. M., DANTAS, E. L., CAWOOD, P.A., SANTOS, E. J., FUCK, R. A. 2017. Neoproterozoic Crustal Growth and Paleoproterozoic Reworking in the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Geochemical and Isotopic Data of TTG and Metagranitic Rocks of the Alto Moxotó Terrane. **Journal of South American Earth Science**, v. 79, p. 342–363, 2017.
- MARINHO, M. M., SABATÉ, P., BARBOSA, J. S. G. The Contendas Mirante volcano-sedimentary belt. *In*: FIGUEIREDO, M. C. H., PEDREIRA, A. J. (EDS.). Petrologic and Geochronologic Evolution of the Oldest Segments of the São Francisco Craton, Brazil. **Boletim do Instituto de Geociências da USP**, v. 17, p. 37–72, 1994.
- MARTIN, H.; PEUCAT, J. J.; SABATÉ, P.; CUNHA, J. C. Crustal evolution in the early Archean of South America: example of the Sete Voltas Massif, Bahia State, Brazil. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 82, n. 1-2, p.35-62, mar. 1997.
- MARTIN, H. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. **Geology**, [s.l.], v. 14, n. 9, p.753-756, 1986.
- MCDONOUGH, W. F.; SUN, S. -s. The composition of the Earth. **Chemical Geology**, [s.l.], v. 120, n. 3-4, p.223-253, mar. 1995.
- MEDEIROS, V. C.; CAVALCANTE, R.; CUNHA, A. L. C.; DANTAS, A. R.; COSTA, A. P.; BRITO, A. A.; RODRIGUES, J. B.; SILVA, M. A. O Furo Estratigráfico de Riacho Fechado (Currais Novos/RN), Domínio Rio Piranhas-Seridó (Província Borborema, NE Brasil): Procedimentos e Resultados. **Estudos Geológicos**, [s.l.], v. 27, n. 3, p.1-40, 5 dez. 2017.

- NADEAU, S.; CHEN, W.; REECE, J.; LACHMAN, D.; AULT, R.; FARACO, M. T. L.; FRAGA, L. M.; REIS, N. J.; BETIOLLO, L. M. Guyana: the Lost Hadean crust of South America? **Brazilian Journal of Geology**, [s.l.], v. 43, n. 4, p.601-606, 1 dez. 2013.
- NASCIMENTO, M. A. L.; GALINDO, A. C.; MEDEIROS, V. C. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 58, p.281-299, mar. 2015.
- NEVES, S. P. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. **Tectonics**, [s.l.], v. 22, n. 4, p.1-13, 9 jul. 2003.
- NEVES, S. P. Atlantica revisited: new data and thoughts on the formation and evolution of a long-lived continent. **International Geology Review**, [s.l.], v. 53, n. 11-12, p.1377-1391, 8 fev. 2011.
- NEVES, S. P. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brazil): Widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 58, p.150-164, mar. 2015.
- PAQUETTE, J. L.; BARBOSA, J. S. F.; ROHAIS, S.; CRUZ, S. C. P.; CONÇALVES, P.; PEUCAT, J. J.; LEAL, A. B. M.; SANTOS-PINTO, M.; MARTIN, H. The geological roots of South America: 4.1 Ga and 3.7 Ga zircon crystals discovered in N.E. Brazil and N.W. Argentina. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 271, p.49-55, dez. 2015.
- PEARCE, T. H. A contribution to the Theory of Variation Diagrams. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 19, p. 142–157, 1968
- PEARCE, J. A. Chameical Variations in the Palisade Sill. **Journal of Petrology**, v. 2, n. 1, p. 15-32, 1970.
- PEARCE, J. A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *In*: HAWKESWORTH, C. J.; NORRY, M. J. (Eds.). **Continental Basalts and Mantle Xenoliths**. Nantwich: Shiva, 1983. p.230-249.
- PEUCAT, J. J., MASCARENHAS, J. F., BARBOSA, J. S. F., SOUZA, S. L., MARINHO, M.M., FANNING, C. M., LEITE, C. M. M. 3.3 Ga SHRIMP U–Pb Zircon Age of a Felsic Metavolcanic rock from the Mundo Novo Greenstone Belt in the

- São Francisco Craton, Bahia (NE Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 15, p. 363–373, 2002.
- ROLLINSON, H. R. **Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation**. London: Longman Scientific and Technical, 1993. 352 pp.
- RUBATTO, D.; GEBAUER, D. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by Ion Microprobe: Some Examples from the Western Alps. **Cathodoluminescence in Geosciences**, [s.l.], p.373-400, 2000. Springer Berlin Heidelberg.
- RUBATTO, D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism. **Chemical Geology**, [s.l.], v. 184, n. 1-2, p.123-138, mar. 2002.
- RUIZ, F. V.; GIUSTINA, M. E. S. D.; OLIVEIRA, C. G.; DANTAS, E. L.; HOLLANDA, M. H. B. The 3.5 Ga São Tomé layered mafic-ultramafic intrusion, NE Brazil: Insights into a Paleoarchean Fe-Ti-V oxide mineralization and its reworking during West Gondwana assembly. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 326, p.462-478, jun. 2019.
- SÁ, J. M.; MCREATH, I.; LETERRIER, J. Petrology, geochemistry and geodynamic setting of Proterozoic igneous suites of the Orós fold belt (Borborema Province, Northeast Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 8, n. 3-4, p.299-314, jul. 1995.
- SABÓIA, L. A.; TEIXEIRA, N. A. Lavas ultrabásicas da unidade basal do Greenstone Belt de Crixás (GO): Uma nova classe de rochas ultramáficas no Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, [s.l.], v. 10, p. 28-42, 1980.
- SANTIAGO, J. S. **Mineralização de Esmeralda Durante a Orogênese Brasileira no Nordeste do Brasil: O Caso do Depósito da Fazenda Bonfim, Estado Do Rio Grande do Norte**. 2017. 92p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- SANTIAGO, J. S.; SOUZA, V. S.; FILGUEIRAS, B. C.; JIMÉNEZ, F. A. C. Emerald from the Fazenda Bonfim Deposit, northeastern Brazil: chemical, fluid inclusions and oxygen isotope data. **Brazilian Journal of Geology**, [s.l.], v. 48, n. 3, p.457-472, 20 ago. 2018.
- SATO, K.; TASSINARI, C. C. G.; BASEI, M. A. S.; SIGA, JR. O.; ONOE, A. T.; SOUZA, M. D. Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP IIe/MC) of the Institute of Geosciences of the University of São Paulo, Brazil: Analytical Method

- and First Results. **Geologia Usp. Série Científica**, [s.l.], v. 14, n. 3, p.3-18, 1 set. 2014.
- SOUZA, Z. S.; MARTIN, H.; PEUCAT, J. J.; JARDIM DE SÁ, E. F.; MACEDO, M. H. F. Calc-Alkaline Magmatism at the Archean–Proterozoic Transition: the Caicó Complex Basement (NE Brazil). **Journal of Petrology**, [s.l.], v. 48, n. 11, p.2149-2185, 9 out. 2007.
- SOUZA, Z. S.; MARTIN, H.; PEUCAT, J. J.; JARDIM DE SÁ, E. F.; MACEDO, M. H. F. Calc-Alkaline Magmatism at the Archean–Proterozoic Transition: the Caicó Complex Basement (NE Brazil). **Journal of Petrology**, [s.l.], v. 48, n. 11, p.2149-2185, 9 out. 2007.
- SPROULE, R. A.; LESHER, C. M.; HOULÉ, M. G.; KEAYS, R. R.; AYER, J. A.; THURSTON, P. C. Spatial and temporal variations in the geochemistry of komatiites and komatiitic basalts in the Abitibi greenstone belt. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 115, n. 1-4, p.153-186, maio 2002.
- SUN, S.; NESBITT, R. W. Petrogenesis of Archaean ultrabasic and basic volcanics: Evidence from rare earth elements. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, [s.l.], v. 65, n. 3, p.301-325, 1978. Springer Nature.
- TAYLOR, S. R.; MCLENNAN, S. M. The origin and evolution of Earth's continental crust. **Journal of Australian Geology and Geophysics**, [s.l.], v. 17, p.52-62, 1997.
- VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; WILLIAMS, I. S.; HACKSPACKER, P. C.; FETTER, A. H.; DANTAS, E. L.; BABINSKI, M. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U–Pb detrital zircon ages and Sm–Nd crustal residence (TDM) ages. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 127, n. 4, p.287-327, dez. 2003.
- VAN SCHMUS, W. R.; KOZUCH, M.; NEVES, B. B. B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Sm–Nd and U–Pb geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 31, n. 2-3, p.227-252, mar. 2011.
- VAUCHEZ, A.; NEVES, S.; CABY, R.; CORSINI, M.; EGYDIO-SILVA, M.; ARTHAUD, M.; AMARO, V. E. The Borborema shear zone system, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 8, n. 3-4, p.247-266, jul. 1995.

- VILJOEN, M. J.; VILJOEN, R. P. The geology and geochemistry of the lower ultramafic unit of the Onverwacht Group and a proposed new class of igneous rocks. **Special Publications Geological Society of South Africa**, Cape Town, v. 2, p.55-85, jan. 1969.
- VILJOEN, M. J.; VILJOEN, R. P.; PEARTON, T. N. The nature and distribution of Archaean komatiite volcanics in South Africa In: ARNDT, N.T.; NISBET, E. G. **Komatiites**. Allen and Unwin, Concord Mass. 1982. p. 53-79.
- WILLIAMS, I. S.; CLAEISSON, S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, [s.l.], v. 97, n. 2, p.205-217, out. 1987.
- WILLIAMS, I. S.; BUICK, I. S.; CARTWRIGHT, I. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia*. **Journal of Metamorphic Geology**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.29-47, 14 dez. 2004.

4 SERPENTINITOS DA PORÇÃO CENTRAL DO DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE, PROVÍNCIA BORBOREMA, NORDESTE DO BRASIL: CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA

Frank G. Santos ^{a,c,*}, Mário T. O. Cavalcanti Neto ^b, Valderéz P. Ferreira ^c, Anelise L. Bertotti ^c

^a Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Superintendência Regional do Recife, Avenida Sul, 2291, Afogados, Recife, Pernambuco, Brasil.

^b Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, Campus Natal Central, Avenida Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

^c Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Geologia, Avenida da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil.

Resumo

Os serpentinitos da porção central do Domínio Rio Grande do Norte (DRGN), extremo nordeste da Província Borborema (PB), ocorrem associados aos gnaisses do Complexo Caicó e paragneisses e xistos do Grupo Seridó. Os serpentinitos foram amostrados em duas localidades próximas a cidade de São Tomé-RN e se apresentam como rochas melanocráticas, de granulação média a grossa, cor esverdeada e serpentina como fase principal. As análises químicas mostraram valores de SiO₂ variando de 35,72 a 43,48 %, MgO > 28,88%, Fe₂O₃ entre 7,08 e 11,29 %, Al₂O₃ < 3,42 %, além de TiO₂, CaO, K₂O e Na₂O muito baixos, sugerindo uma composição ultrabásica. O elevado conteúdo de magnésio aponta para uma assinatura komatiítica das rochas estudadas, implicando em uma fonte peridotítica que envolve alta temperatura, alta pressão e alto grau de fusão parcial. A história da PB remonta ao eoarqueano, passando por amalgamação de blocos no Paleoproterozoico e soerguimento/movimentação no Neoproterozoico. Os dados de litoquímica sugerem que estas rochas poderiam fazer parte de um *greenstone belt* desmembrado

Palavras Chave: Ultramáficas; Província Borborema; Geoquímica.

1. Introdução

Serpentinitos são rochas que consistem principalmente de minerais do grupo da serpentina, os quais são formados por hidratação de rochas ultramáficas, onde os principais minerais ricos em Mg (olivina e piroxênios) são substituídos por minerais hidratados de silicato de magnésio (as serpentinas) (EVANS et al., 2013). Essas rochas são de difícil interpretação em termos de petrogênese, visto que a sua mineralogia primária raramente é preservada devido ao processo de hidratação que modifica a composição original da rocha (SZILAS et al., 2014).

As rochas máficas-ultramáficas sempre despertam o interesse dos profissionais das geociências, inicialmente pelo fato de apresentarem em pequenas áreas aflorantes, sendo assim de ocorrência rara, mas também pelo fato de estarem geralmente associadas a depósitos de minerais metálicos e gemas.

Na porção central do Domínio Rio Grande do Norte (DRGN), extremo nordeste da Província Borborema (PB), serpentinitos ocorrem associados a gnaisses do Complexo Caicó e paragneisses e micaxistos do Grupo Seridó. Em outras áreas da PB, geralmente compõem sequências máficas-ultramáficas em contato com granitos e gnaisses (LIRA SANTOS, 2012; SANTOS et al., 2014; UCHOA FILHO et al., 2014; PITOMBEIRA et al., 2016).

Este trabalho tem como proposta a caracterização petrológica e geoquímica desses serpentinitos, buscando contribuir para o entendimento do seu significado petrológico-tectônico no Domínio Rio Grande do Norte.

2. Contexto Geotectônico

A PB (ALMEIDA et al., 1981) compreende a parte nordeste da plataforma Sul Americana e é resultado da convergência tectônica dos crátons do Oeste Africano-São Luís e São Francisco-Congo (CABY, 1989; ARTHAUD et al., 2008), como parte da consolidação do Gondwana Oeste (Figura 1 A). Esta província está localizada na borda nordeste do Brasil e é limitada ao sul pelo Cráton São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e ao norte e a leste por bacias costeiras Fanerozoicas.

A PB consiste de um embasamento gnáissico-migmatítico Arqueano a Paleoproterozoico sobreposto por sequências supracrustais, e todo esse pacote de rochas foi intrudido por uma grande quantidade de granitoides Neoproterozoicos (JARDIM DE SÁ, 1994; SOUZA et al., 2007; 2015), estando segmentada por um sistema complexo Neoproterozoico de zonas de cisalhamento de alta temperatura

com escala crustal (JARDIM DE SÁ, 1994), que define uma configuração de domínios tectônicos independentes. De uma forma geral, a PB está dividida em três subprovíncias maiores (Figura 1 B): Subprovíncia Sul (entre o Lineamento Pernambuco e o Cráton São Francisco), Subprovíncia Central ou Zona Transversal (entre os lineamentos Pernambuco e Patos) e Subprovíncia Norte (a norte do Lineamento Patos), que é composta pelos domínios Rio Grande do Norte, Ceará Central e Médio Coreaú (BRITO NEVES et al., 2000; VAN SCHMUS et al., 2011; NEVES, 2015).

A área de estudo está dentro dos limites do DRGN que é composto por ortognaisses arqueanos de 3,5 a 2,5 Ga [DANTAS, 2004 (U-Pb SHRIMP); HOLLANDA et al. (U-Pb LA-ICP-MS), 2015; CAVALCANTE et al., 2018 (U-Pb SHRIMP)] e rochas metavulcanossedimentares/metaplutônicas Paleoproterozoicas [2,2 Ga (Rb-Sr)] do Complexo Caicó (Souza et al., 2007) no embasamento, pelas faixas de dobramentos Orós-Jaguaribe (Paleoproterozoico) e Seridó (Neoproterozoico) (JARDIM DE SÁ, 1994; 1995). O Domínio do Rio Grande do Norte foi cenário de expressivo magmatismo da idade Ediacarana durante a orogênese Brasileira, quando um plutonismo massivo com ampla gama de composição ocorreu entre 0,6 e 0,5 Ga [U-Pb, Rb-Sr e Sm-Nd (NASCIMENTO et al., 2015)] (ALMEIDA et al., 1967; CABY et al., 1991; JARDIM DE SÁ, 1994; SOUZA et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2015).

O embasamento da área estudada é constituído por rochas do Complexo Caicó, composto por rochas metavulcânicas e metassedimentares Paleoproterozoicas [2,15-2,20 Ga (Rb-Sr) SOUZA et al., 2007] (metabasaltos, anfibólio-gnaisses, tufos intermediários félsicos e silimanita-muscovita-granada-biotita gnaisses) e rochas metaplutônicas (gabros, tonalitos, granodioritos e granitos) metamorfisadas no fácies anfibolito superior a granulito, próximas a intrusões plutônicas (JARDIM DE SÁ, 1994; SOUZA et al., 2007). Este embasamento é coberto por rochas do Grupo Seridó, que engloba uma sequência supracrustal de idade Neoproterozoica [0,65-0,61 Ga (U-Pb SHRIMP) VAN SCHMUS et al., 2003] denominada de Formação Jucurutu na base (paragnaisses dominantes e intercalações de mármore, quartzitos, rochas calciossilicáticas, metaconglomerados, rochas metavulcânicas e formações ferríferas), quartzitos e metaconglomerados da Formação Equador na porção intermediária, e muscovita-biotita xistos da Formação Seridó no topo (com

intercalações diversas de mármore, rochas metavulcânicas, calciossilicáticas e metaconglomerados) (JARDIM DE SÁ, 1994).

Os serpentinitos que afloram perto da cidade de São Tomé, no Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1 C), e ocorrem como lentes descontínuas não superiores a 300 metros, alinhadas à foliação regional de tendência NNE (Figura 1 D). Esses litotipos possuem como encaixantes os gnaisses e migmatitos do Complexo Caicó e rochas metassedimentares do Grupo Seridó, e foram fortemente afetados por zonas de cisalhamento regionais. Além disso, a interação dessas rochas ultramáficas com os granitos brasileiros da área de estudo foi responsável pela mineralização de esmeraldas da Mina Serra Verde (ZWAAN et al., 2012) e por esse motivo foram selecionadas para uma melhor caracterização (Figura 2).

3. Materiais e Métodos

Um total de sete análises químicas de rocha total foram realizadas para as rochas meta ultramáficas no AcmeLabs™ (Vancouver, Canadá). As concentrações de elementos maiores, menores e traços foram determinados por Espectrometria de Emissão de Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-ES), em que uma porção de cada amostra é fundida usando metaborato/tetraborato de lítio, e então diluída em digestão nítrica. A perda ao fogo é medida pela diferença entre o peso desta amostra antes e depois de ser elevada a uma temperatura de 1000°C. Os resultados são mostrados na Tabela 1.

As análises qualitativas para os elementos Ni, Fe, Cr, Si e Mg por WDS (*Wavelength Dispersive Spectroscopy*) foram realizadas em duas amostras metalizadas com carbono no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) do departamento de Engenharia Eletrônica da Universidade Federal de Pernambuco, utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 6460.

4. Resultados

4.1 Características de Campo e Petrografia

Os serpentinitos (Figura 3) ocorrem como pequenos corpos alongados na parte centro-norte da área estudada, como também sob a forma de enclaves arredondados de espessura métrica em gnaisses, como observado na mina de esmeralda de Serra Verde (Figura 3A) e em uma antiga trincheira de exploração de

scheelita na mina de Oiticica (Figura 3B), ambas nos arredores da cidade de São Tomé.

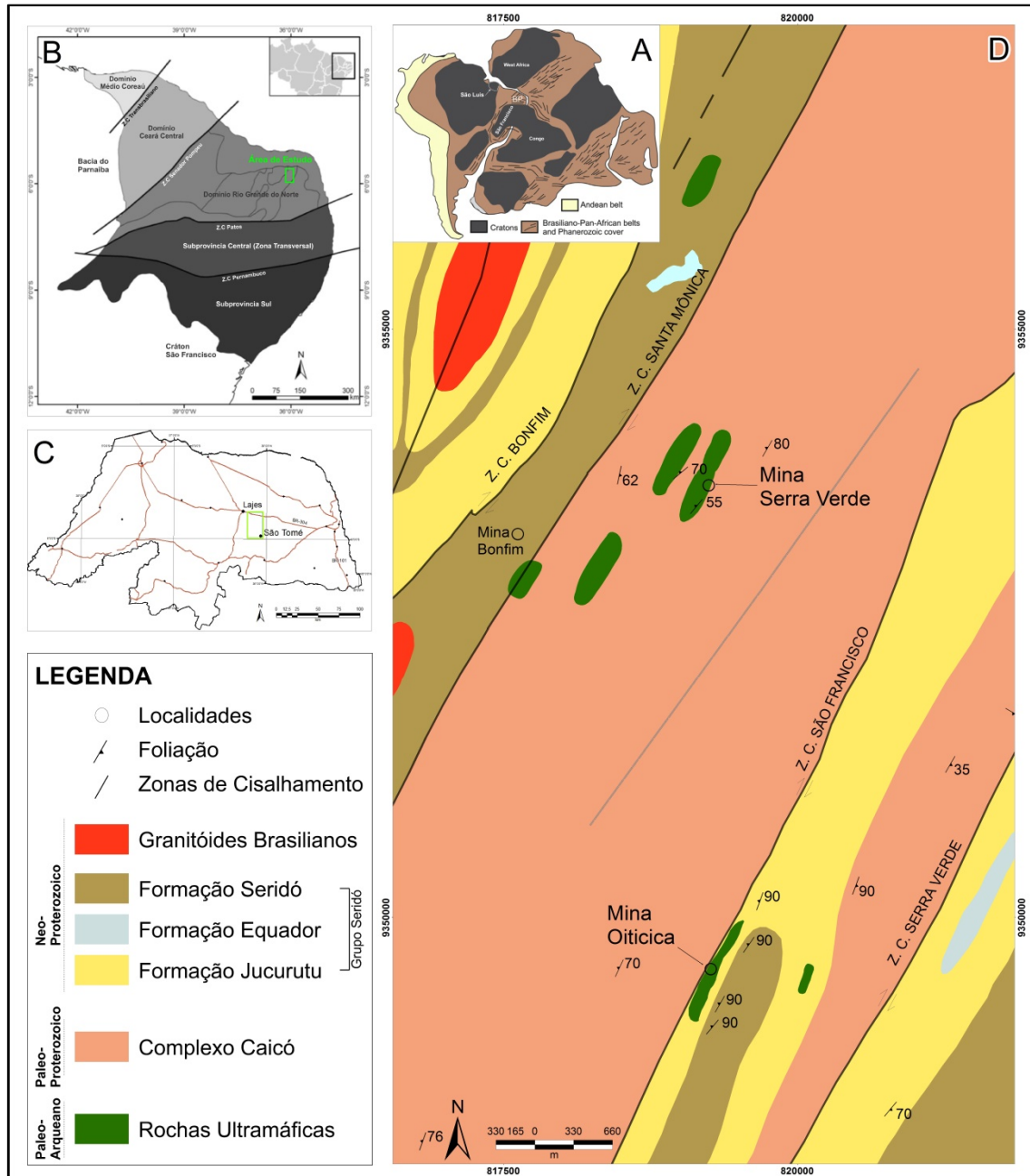


Figura 1 – A: Reconstituição Pré-drift da América do Sul e África no supercontinente Gondwana. Figura adaptada de Neves (2015). B: Localização da área de estudo no contexto da Província Borborema. Figura modificada de Jesus (2011). C: Localização da área de estudo e das cidades Lajes e São Tomé dentro do estado do Rio Grande do Norte. D: Mapa geológico da área de estudo.

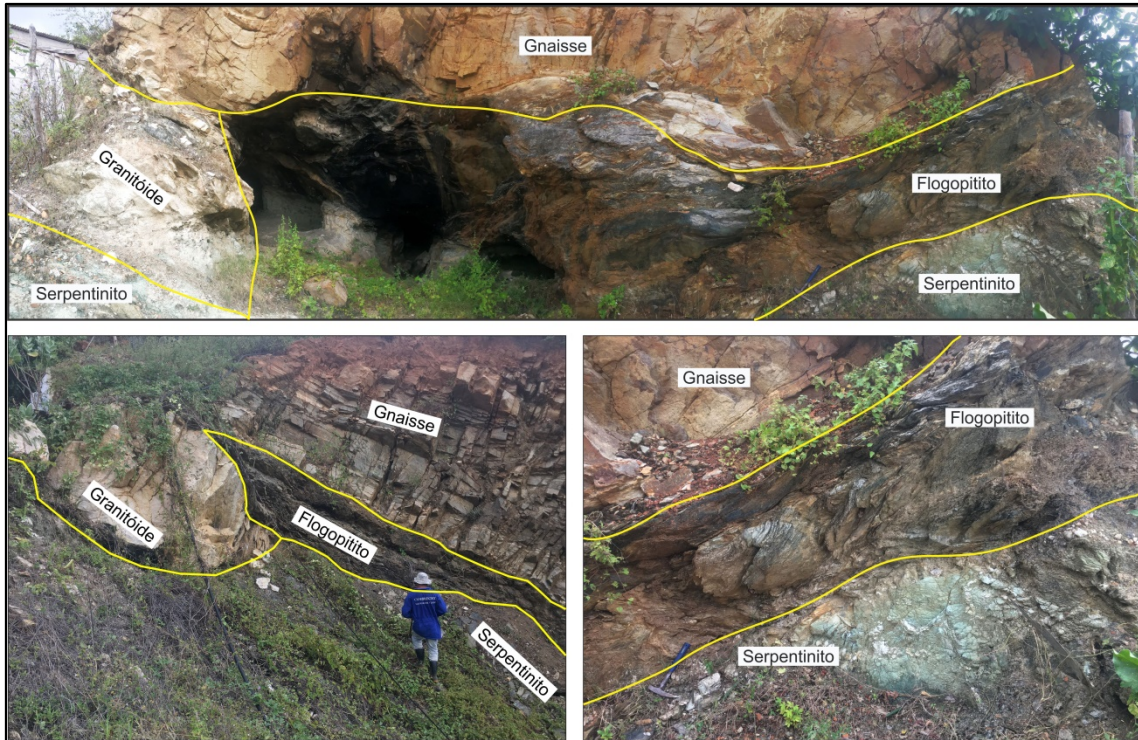


Figura 2 – Relação do serpentinito com as rochas encaixantes na Mina Serra Verde.

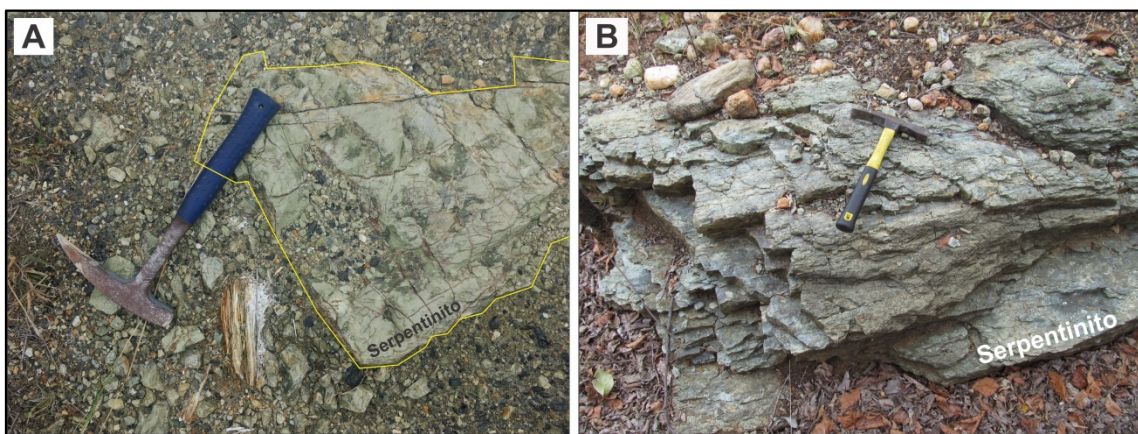


Figura 3 – A: Serpentinito da Mina Serra Verde [Coordenadas (UTM) X: 819254 Y: 9349535]. B: Serpentinito da Mina Oiticica [Coordenadas (UTM) X: 819228 Y: 9353606].

Os serpentinitos, em geral, são rochas melanocráticas, de granulação média a grossa, apresentando por vezes grãos alongados de serpentina com até 1,0 cm de comprimento. Normalmente a rocha apresenta cor esverdeada quando inalterada, principalmente devido à grande quantidade de serpentina. Serpentina é a fase principal (75-99%) nos litotipos de ambas as localidades, em que ocorre substituindo os minerais ferromagnesianos primários do protólito e mostrando inclusões de minerais opacos. Nos serpentinitos da mina Serra Verde os minerais acessórios são

clorita (<2%) e opacos (<1%), enquanto os serpentinitos da mina Oiticica apresentam uma variedade mineralógica maior e contém muscovita (<2%), tremolita (<2%), minerais opacos (<3%), calcita-dolomita (20-25%) e quartzo exsudado (<3%). Esses minerais ocorrem como cristais xenoblásticos, apresentando contatos irregulares com a serpentina, e os opacos também se mostra preenchendo fraturas micrométricas na rocha (Figura 4).

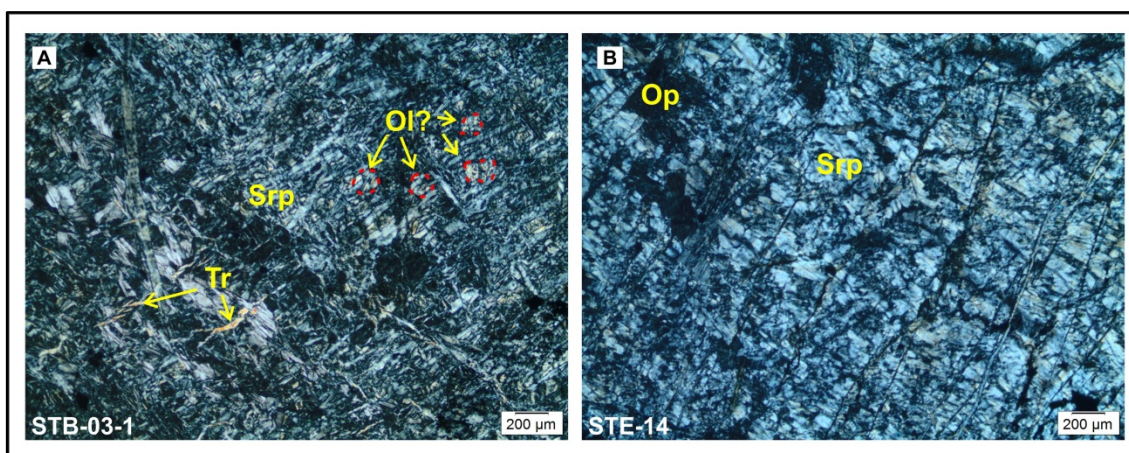


Figura 4 – A: Serpentinito da Mina Oiticica. B: Serpentinito da Mina Serra Verde. Srp = Serpentina, Op = Opacos, Tr = Tremolita e Ol = Olivina.

4.2 Litoquímica

As composições químicas dos serpentinitos estão representadas nos gráficos abaixo de acordo com o local de coleta, minas de Oiticica e Serra Verde. As análises das rochas mostraram valores de SiO_2 variando de 35,72 a 43,48 %, MgO de 28,88 a 34,63 %, Fe_2O_3 de 7,08 a 11,29 %, Al_2O_3 de 1,04 a 3,42 %, TiO_2 de 0,02 a 0,05 %, CaO de 0,05 a 2,53 %, K_2O de 0,01 a 0,20 % e Na_2O de 0,01 a 0,03 %. Os gráficos binários de MgO *versus* óxidos de elementos maiores (Figura 5) não evidenciam distinções entre os serpentinitos das duas minas, sem tendências claras de correlação. De um modo geral, os serpentinitos das minas de Oiticica e Serra Verde apresentam comportamentos semelhantes para os óxidos de elementos maiores, sendo que algumas amostras da mina de Oiticica apresenta teores mais altos de Al_2O_3 , CaO , P_2O_5 , SiO_2 , TiO_2 , FeO e Cr_2O_3 , enquanto que na mina Serra Verde algumas amostras revelam teores relativamente mais altos de K_2O e Na_2O , o que é compatível com sua mineralogia, descrita na seção anterior.

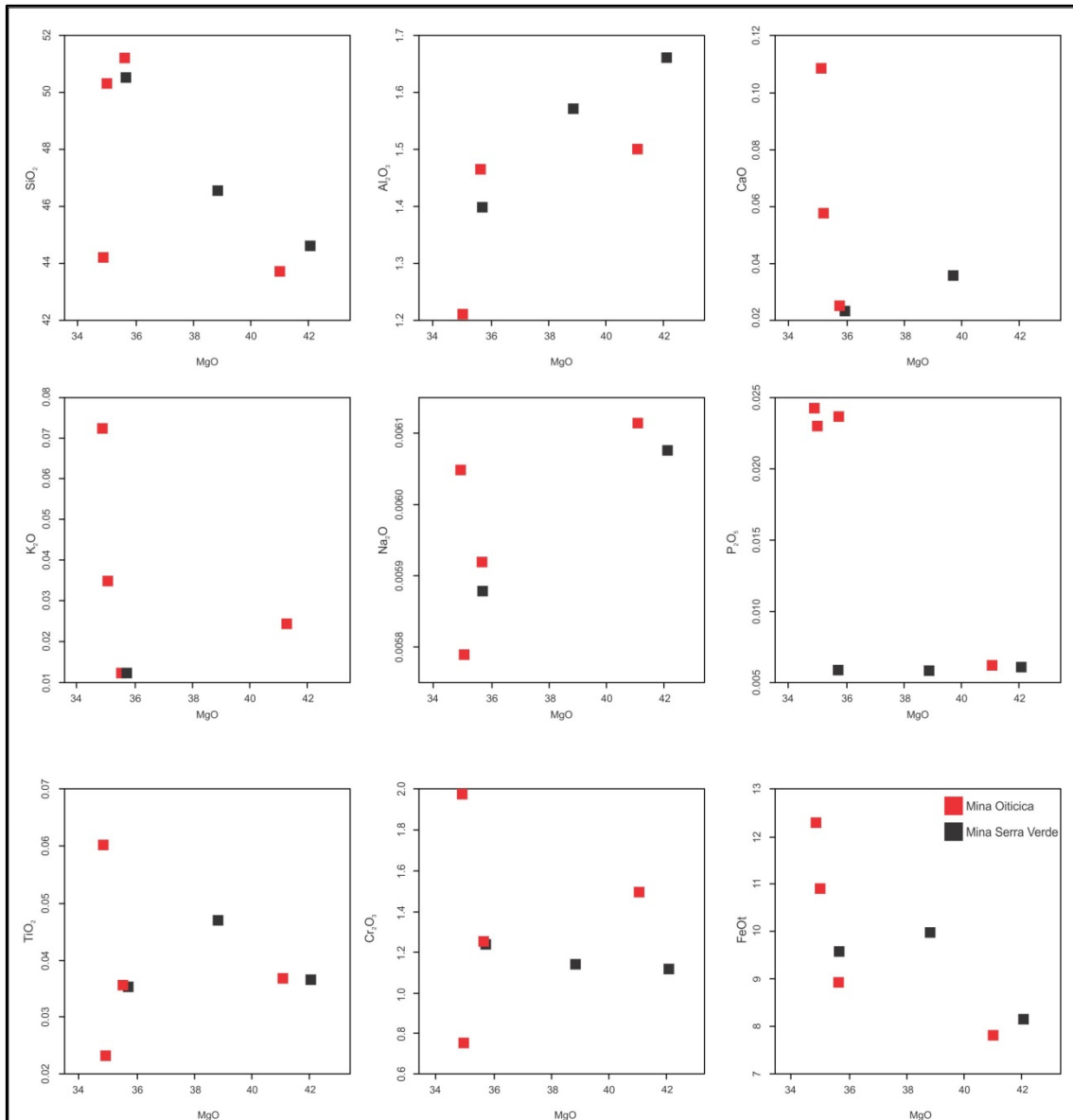


Figura 5 – Diagramas de variação usando MgO (% em peso) como índice de diferenciação *versus* óxidos de elementos maiores (% em peso) para os serpentinitos das minas Serra Verde e Oitica. (Valores recalculados para 100% retirando o LOI e algumas amostras anômalas indicadas pelos revisores).

Para avaliar se os serpentinitos da área de estudo tiveram sua composição inicial bastante modificada, diagramas envolvendo razões de proporções moleculares foram criados envolvendo os elementos magnésio, silício e alumínio (Figura 6). Rochas ultrabásicas sugerem que as fases principais na cristalização fracionada sejam olivina e/ou piroxênio, logo os elementos supracitados participariam efetivamente desse processo, enquanto outros elementos se portariam de forma incompatível. No diagrama MgO/Al_2O_3 *versus* SiO_2/Al_2O_3 (PEARCE, 1968,

1970) é possível identificar dois *trends* lineares para as amostras dos serpentinitos estudados, sendo um dos *trends* bem próximo da declividade da olivina (1:3) e o outro *trend* (1:0) não se aproxima da seta que indica o fracionamento da augita. Sugerindo assim que a olivina constituiu uma fase de fracionamento fundamental nessas rochas e os resultados das análises químicas provavelmente ainda refletem a composição original do protólito, embora os estudos petrográficos indiquem a atuação de processos metamórficos/metassomáticos.

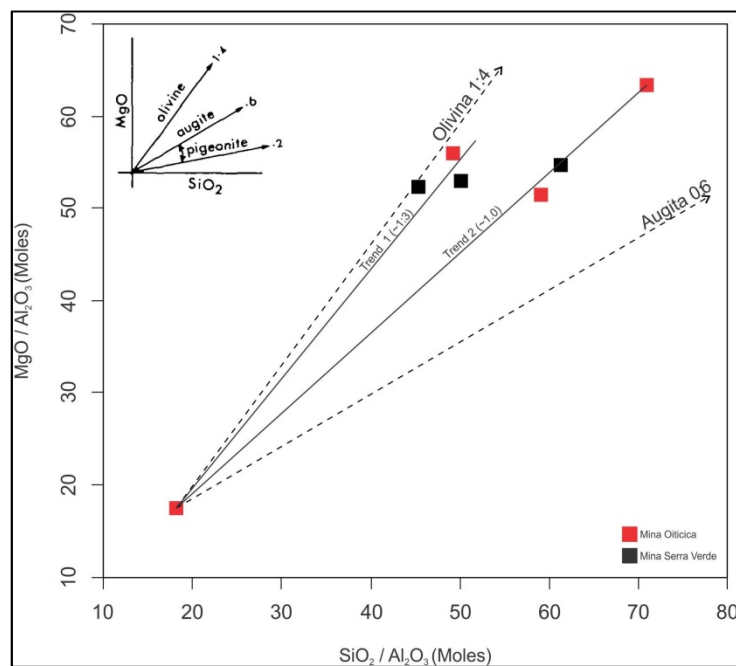


Figura 6 – Diagrama $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ versus $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ proposto por Pearce (1968, 1970) para os serpentinitos estudados. As setas correspondem aos fracionamentos de olivina, augita e pigeonita e as linhas demonstram os dois *trends* formados pelas amostras analisadas.

No diagrama de elementos traços normalizados para o manto primitivo segundo McDonough & Sun (1995) (Figura 7 A) observa-se um padrão com picos positivos de U e Pb, e moderados picos negativos de Sr e Ti. Os elementos traços litófilos de íons grandes (LILE) apresentam um enriquecimento discreto em relação ao manto primitivo, enquanto os elementos de ligação forte mostram empobrecimento.

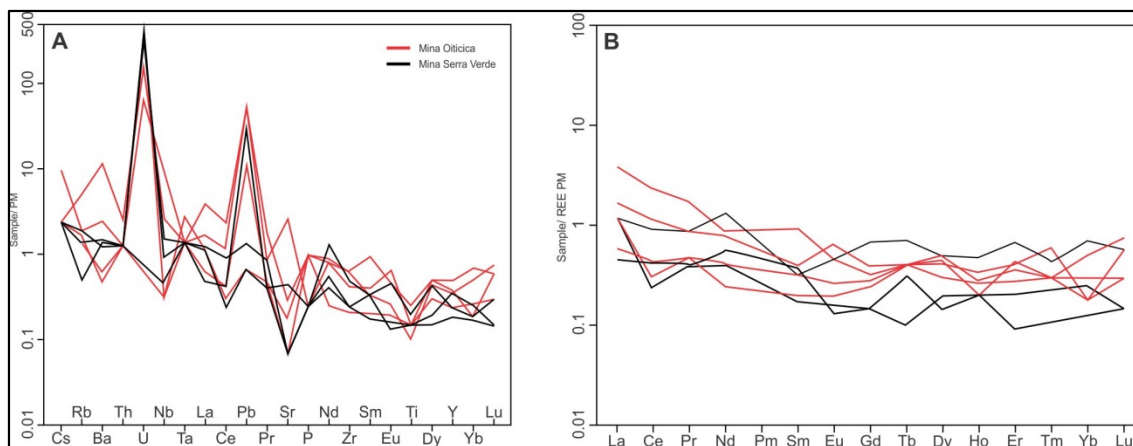


Figura 7 – A: Padrão de elementos traços normalizados ao manto primitivo para os serpentinitos das minas Serra Verde e Oitica (MCDONOUGH; SUN, 1995). B: Padrão de elementos terras raras normalizados ao manto primitivo para os serpentinitos das minas Serra Verde e Oitica (MCDONOUGH; SUN, 1995).

No diagrama dos elementos terras raras normalizados para o manto primitivo segundo McDonough & Sun (1995) (Figura 7 B), também é possível observar um padrão próximo ao horizontal, sem anomalias, com concentrações ligeiramente mais baixas que o manto primitivo, exceto por La e Ce, que ligeiramente mais enriquecidos, gerando um padrão ligeiramente fracionado.

Para os serpentinitos da mina Oitica observam-se 2 padrões para os elementos traço normalizados e 2 padrões para os ETR normalizados. A amostra STC-14C2 apresenta teores bem mais elevados em Ba, Nb, Rb, Pb, ETR de uma forma geral, e mais claramente La e Ce. A amostra STB-3C também apresenta pico positivo em Ba, ainda que os teores sejam bem mais baixos que os da amostra anterior. Essa amostra também apresenta pico positivo em Pb. Entretanto, diferentemente da anterior apresenta os teores mais baixos em Nb. Nos padrões das outras duas amostras da mina Oitica não se registra essas anomalias de Pb. Essas amostras apresentam pequenos picos positivos de Pb.

Os serpentinitos da Mina Serra Verde também apresentam padrões distintos. A amostra AM-7C apresenta teores mais elevados em Sr, Pb, e os mais baixos em Rb, U, Y, La e Nd. O aumento no teor de Pb foi mais de 40x.

No MEV, as rochas coletadas na mina Serra Verde mostraram presença mais pronunciada de Cr e Fe, o que é esperado em rochas ultramáficas serpentinizadas. As amostras da mina de Oitica registraram um pico muito forte de Mg em detrimento aos outros elementos analisados. Apesar dos teores elevados de Ni (<

4623 ppm), este não mostrou picos com forte intensidade, a explicação pode estar no local do spot na seção analisada. O Si aparece em todas as análises, mas sem muita expressividade (Figura 8).

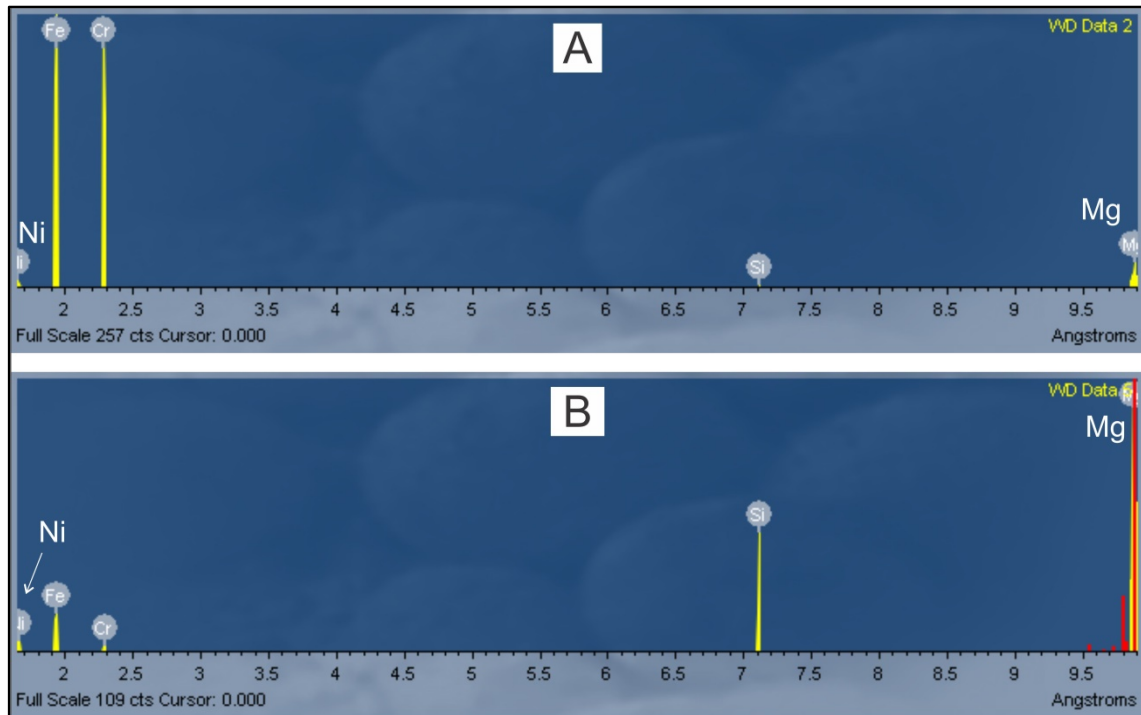


Figura 8 – A: Análise qualitativa no MEV-WDS do serpentinito da Mina Serra Verde. B: Análise qualitativa no MEV-WDS do serpentinito da Mina Oitica.

Tabela 1 – Composição química dos serpentinitos amostrados nas minas Oitica e Serra Verde.

Tabela 1 - Composição química dos serpentinitos amostrados nas minas Oitica e Serra Verde.

	Mina Oitica				Mina Serra Verde		
	STB-03	STB-03C	STB-03D	STC-14C2	STE-14	STE-14B	AM-7C
SiO ₂ (%)	43.48	35.72	43.25	36.53	39.62	42.95	36.69
MgO	30.27	33.59	30.12	28.88	33.10	30.36	34.63
Al ₂ O ₃	1.04	1.23	1.24	3.42	1.34	1.19	1.37
Cr ₂ O ₃	0.65	1.22	1.06	1.64	0.97	1.06	0.92
Fe ₂ O ₃	10.46	7.08	8.39	11.29	9.44	9.05	7.46
K ₂ O	0.03	0.02	0.01	0.06	0.20	0.01	0.01
Na ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
MnO	0.09	0.11	0.07	0.22	0.13	0.13	0.11
TiO ₂	0.02	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03
LOI	12.40	16.70	14.20	15.90	14.20	13.60	16.90
Sum	98.81	98.55	98.75	98.66	99.38	98.75	99.22
Ba (ppm)	4.00	16.00	3.00	74.00	8.00	10.00	9.00
Co	195.60	112.90	128.40	193.30	130.00	192.80	112.10
Cs	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Cu	2.40	12.90	2.60	8.10	12.80	2.50	5.90
Ga	2.50	1.80	2.40	4.00	3.80	2.40	1.40
Hf	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Nb	0.20	0.10	0.20	1.70	1.00	0.60	0.30
Ni	2606.00	2426.00	2636.00	4623.00	2310.00	2481.00	2346.00
Pb	1.60	7.70	0.10	7.60	0.20	0.10	4.30
Rb	0.80	1.10	1.00	3.00	1.10	0.80	0.30
Sc	6.00	4.00	5.00	8.00	6.00	4.00	5.00
Sr	3.50	50.70	1.40	5.70	1.30	1.40	8.80
Ta	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Th	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
U	0.10	1.30	10.30	3.00	6.20	10.50	0.10
V	51.00	47.00	41.00	56.00	59.00	33.00	11.00
Y	1.40	1.00	1.60	2.10	1.00	1.50	0.80
Zn	12.00	11.00	23.00	25.00	36.00	24.00	7.00
Zr	6.10	4.30	2.20	6.30	5.00	2.50	2.40
La (ppm)	0.40	1.10	0.70	2.50	0.80	0.70	0.30
Ce	0.70	1.90	0.50	3.90	1.50	0.40	0.70
Pr	0.12	0.21	0.12	0.45	0.22	0.10	0.10
Nd	0.30	1.00	0.30	1.10	1.60	0.50	0.70
Sm	0.13	0.16	0.08	0.38	0.13	0.07	0.15
Eu	0.04	0.10	0.03	0.07	0.07	0.02	0.02
Gd	0.15	0.21	0.13	0.37	0.17	0.08	0.08
Tb	0.04	0.04	0.04	0.07	0.04	0.01	0.03
Dy	0.31	0.20	0.34	0.33	0.28	0.13	0.10
Ho	0.03	0.04	0.04	0.07	0.05	0.02	0.03
Er	0.20	0.12	0.16	0.29	0.18	0.09	0.04
Yb	0.22	0.05	0.08	0.30	0.08	0.11	0.05
Lu	0.05	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01	0.01

5. Discussão

5.1 Composição Química: Comparação dos Serpentinóis e a Relação com Depósitos Minerais

A mineralogia identificada através de seções delgadas e em campo (serpentina, clorita, tremolita, carbonatos, muscovita, opacos) sugere um metamorfismo de fácies xisto-verde e a dispersão observada nos gráficos de elementos maiores e traços revelam alguma perturbação na química original da rocha causada por metassomatismo, eventos esses já reportados em outras rochas máficas-ultramáficas da região (ZWAAN et al., 2012; SANTIAGO, 2017; RUIZ et al., 2018). As análises no MEV-WDS mostraram que os teores de Fe e Cr foram bem discrepantes entre os serpentinitos, onde a mineralização de esmeralda e os níveis micrométricos de magnetita na mina Serra Verde corroboram para esses resultados.

No geral, os serpentinitos das duas localidades mostraram concentrações similares de elementos traços (LILE, HFSE e ETR), e mesmo se tratando de elementos menos móveis ainda não é possível separá-los em dois grupos distintos, pois algumas amostras ainda se sobrepõem as outras.

Os depósitos minerais na região da área de estudo são conhecidos desde a década de 1940 e na sua maioria estão relacionados em tempo e espaço com os plútons da suíte ígnea brasileira e/ou zonas de cisalhamento como conduto de fluidos (SOUZA NETO et al., 2008). Na mina Oitica, o produto principal é a scheelita (W) e não foi observada relação direta de entre o serpentinito com essa mineralização, mas na mina Serra Verde as esmeraldas ocorrem devido à associação dos serpentinitos com corpos pegmatíticos e a zona de cisalhamento Santa Mônica (ZWAAN et al., 2012). Assim, o conhecimento de corpos ultramáficos nas proximidades de suítes ígneas é de grande importância para abrir uma nova janela de exploração em uma região que já tem grande tradição na atividade de mineração.

5.2 Modelo Evolutivo: Fonte do Magma e Implicações Geotectônicas

Os teores elevados de MgO e Fe₂O₃, junto com os baixos de Al₂O₃, TiO₂ e K₂O sugere uma classificação komatiítica para as rochas estudadas seguindo os parâmetros de Jensen (1976), Viljoen et al., (1982), Le Bas (2000) e Le Maitre (2002) (Figura 9), sugerindo uma origem por fusão parcial de um manto peridotítico (ARNDT; NISBET, 1982). A ausência de textura spinifex (KERR; ARNDT, 2001) é

compreensível e provavelmente foi apagada devido as várias fases de deformação as quais as rochas da região foram submetidas (JARDIM DE SÁ, 1994).

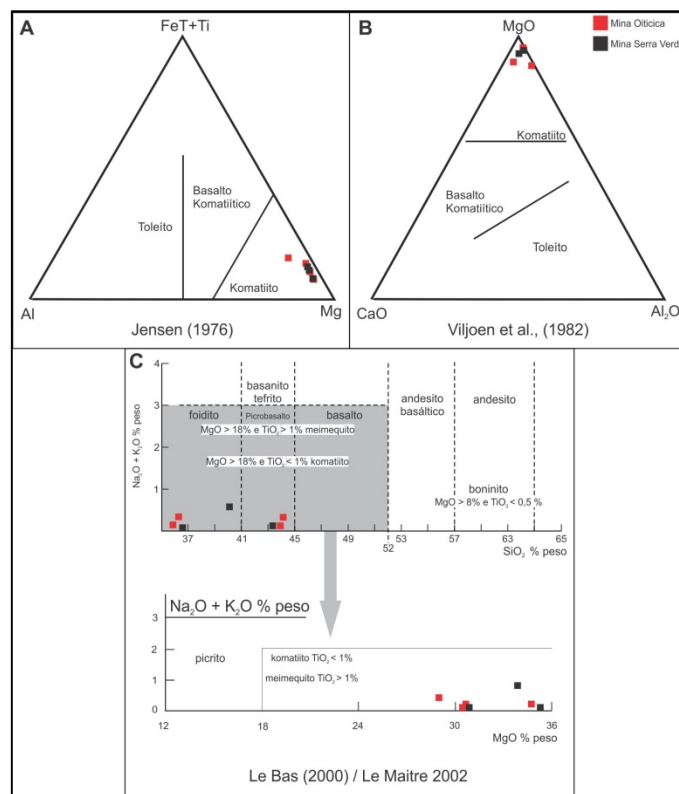


Figura 9 – Classificação química dos serpentinitos estudados segundo A: Jensen (1976). B: Viljoen et al. (1982). C: Le Bas (2000) e Le Maitre (2002).

O conteúdo médio de magnésio nas rochas estudadas é de 36,32 %, e de acordo com Nisbet (1982) é possível calcular a temperatura de lavas komatiíticas através da equação: $T_{\text{liquidus}} = 1400 + [(MgO\% - 20) \times 20]$, o que nos dá um valor de 1726,4°C. Com essa temperatura, Bickle et al. (1977) sugere que líquidos de composição komatiítica seriam formados a uma pressão de aproximadamente 30 Kbar, e Condie (1989) indica que a fusão parcial nessas condições pode variar de 35-50%.

Dantas et al. (2004; 2013) e Souza et al. (2015) sugerem que pelo menos sete pulsos magmáticos arqueanos (entre 3,5 Ga e 2,8 Ga) ocorreram no Maciço São José de Campestre (MSJC) (extremo leste do domínio RGN), e algumas idades T_{DM} entre 3,2 e 4,1 Ga (DANTAS et al., 2004; SOUZA et al., 2015) indicam que houve reciclagem de fragmentos crustais mais antigos e acreção de material mais jovem. Recentemente, 50 quilômetros a oeste do MSJC, idades entre 3,5 Ga e 3,7 Ga

(Ruiz, et al., 2019; Gurgel Santos et al., em submissão) foram reportadas em rochas máficas-ultramáficas também no domínio RGN (Quadro 1).

Quadro 1 – Ocorrência de rochas arqueanas na porção leste do Domínio RGN da PB.

Rocha Datada	Contexto	Idade (Ma)	Método	T _{DM} (Ga)	Epsilon Nd(t)	Referência
Tonalito	MSJC	3412 ± 8	TIMS, SHRIMP	3.81	-2.24	Dantas et al. (2004)
Granito	MSJC	3356 ± 21	LA-ICP-MS	3.54	+0.34	Souza et al. (2015)
Granito	MSJC	3393 ± 17	LA-ICP-MS	3.66	-1.16	Souza et al. (2015)
Granito	MSJC	3255 ± 4	TIMS, SHRIMP	3.63	-2.39	Dantas et al. (2004)
Tonalito	MSJC	3333 ± 77	SHRIMP	3.27	+1.40	Dantas et al. (2004)
Tonalito	MSJC	3178 ± 8	TIMS, SHRIMP	3.25	+1.20	Dantas et al. (2004)
Granito	MSJC	3118 ± 19	LA-ICP-MS	3.53	-3.21	Souza et al. (2015)
Gabro	MSJC	3033 ± 3	TIMS, SHRIMP	3.91	-2.87	Dantas (1996)
Granito	MSJC	2685 ± 9	SHRIMP	3.32	-4.20	Dantas et al. (2004)
Anfibolito	MSJC	3447 ± 17	SHRIMP	4.02	-5.0	Dantas et al. (2004)
Serpentinito	Embasamento Bonfim (?)	3747 ± 12	SHRIMP			Gurgel Santos et al. (2019)
Serpentinito	Embasamento Bonfim (?)	3526 ± 5	SHRIMP			Gurgel Santos et al. (2019)
Ortognaisse	Intrusão São Tomé	3508 ± 16	LA-ICP-MS			Ruiz et al. (2018)
Clinopiroxenito	Intrusão São Tomé	3506 ± 20	LA-ICP-MS			Ruiz et al. (2018)

Unindo informações de campo com petrografia, química de rocha total e os dados isotópicos disponíveis na literatura (Dantas et al., 2004; 2013; Souza et al., 2015; Ruiz et al., 2017; Santiago et al., 2017; Gurgel Santos et al., em submissão) foi possível propor um modelo evolutivo (Figura 10) para as rochas meta ultramáficas que são objetos desse estudo e que pode ser visualizado na Figura 8. Segundo Gurgel Santos et al. (em submissão), os serpentinitos das minas Serra Verde e Oiticica são as rochas mais antigas da América do Sul até o momento (3526 e 3747 Ma, respectivamente), mas Dantas et al. (2004, 2013) e Souza et al. (2015)

reportaram idades modelo maiores (Quadro 1), indicado que uma crosta mais antiga pode ter existido só que não foi mapeada até agora ou já sofreu reciclagem.

Assim, a história da PB remonta ao Eoarqueano, onde a condição de alto grau geotérmico permitiria um elevado percentual de fusão parcial de um manto peridotítico sob uma crosta continental pré-existente para gerar as rochas que seriam os protólitos dos serpentinitos. Após um determinado período, os blocos arqueanos foram incorporados e amalgamados durante o Paleoproterozoico até o Neoproterozoico, sendo afetados pela colocação de vários plútons neste último. Também no Neoproterozoico houve a implantação de importantes zonas de cisalhamento, que foram responsáveis pelo soerguimento dos corpos ultramáficos e a separação destes dos demais litotipos arqueanos (JARDIM DE SÁ et al. 1995; DELGADO et al. 2003; NEVES 2003, 2011; RUIZ et al. 2018; GURGEL SANTOS et al. em submissão).

6. Conclusão

Com base nos dados adquiridos, nosso estudo dos serpentinitos do domínio Rio Grande do Norte indica que:

- Os serpentinitos ocorrem como pequenos corpos alongados em contato com os metassedimentos do Grupo Seridó e gnaisses-migmatitos do Complexo Caicó. São rochas melanocráticas, de granulação média a grossa, cor esverdeada, serpentina como fase principal e clorita, opacos, muscovita, tremolita, calcita-dolomita como minerais acessórios.
- As análises das rochas mostraram valores de SiO_2 variando de 35,72 a 43,48 %, $\text{MgO} > 28,88\%$, Fe_2O_3 entre 7,08 e 11,29 %, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 3,42\%$, além de TiO_2 , CaO , K_2O e Na_2O muito baixos. Sugerindo altas temperaturas, pressões e elevado grau de fusão parcial de um magma komatiítico.
- A história da PB remonta ao eoarqueano com fusão parcial do manto sob uma crosta pré-existente, amalgamação de blocos arqueanos no Paleoproterozoico e soerguimento/movimentação no Neoproterozoico.
- Os dados sugerem que estas rochas poderiam fazer parte de um greenstone belt desmembrado.

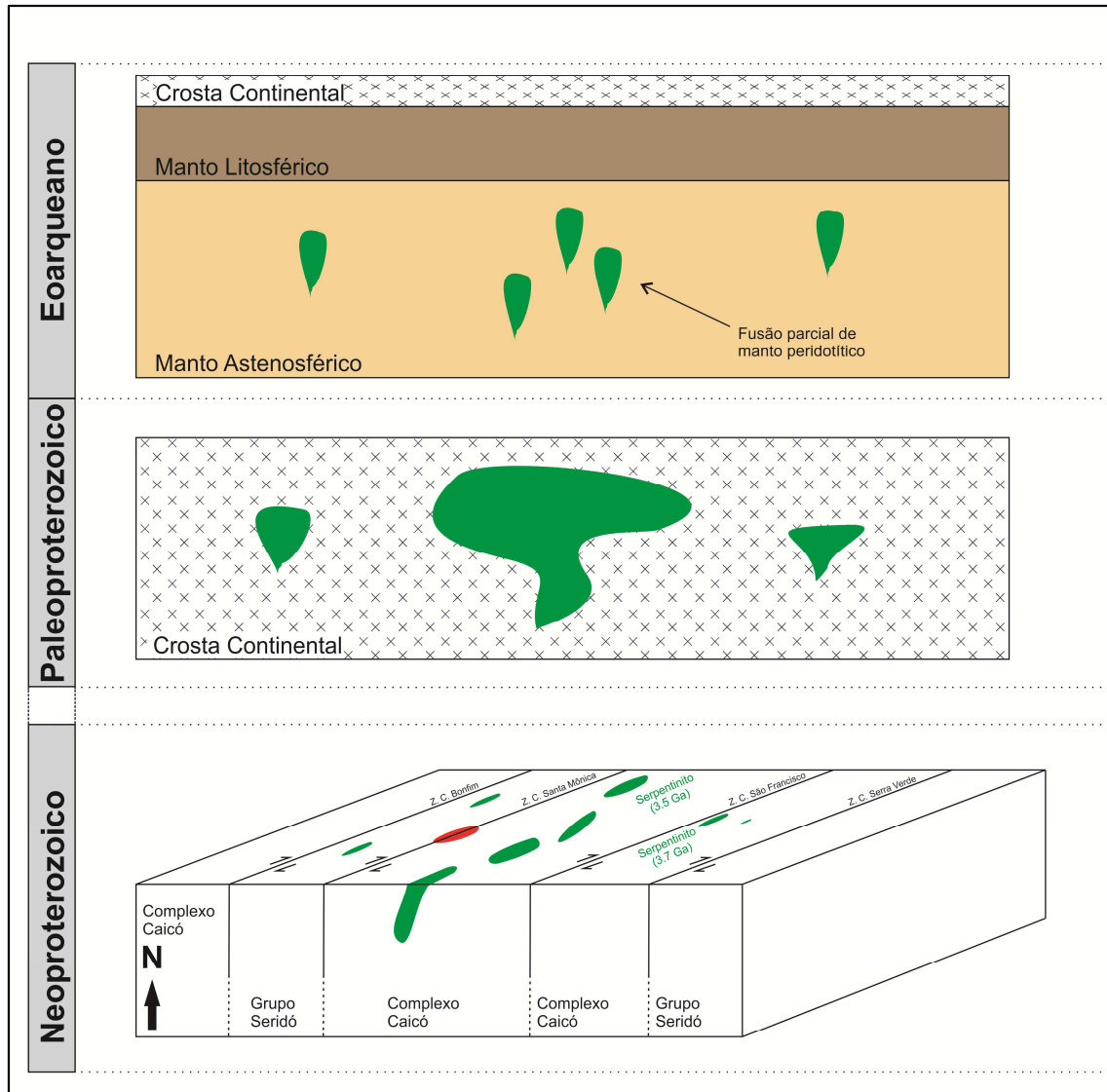


Figura 10 – Modelo evolutivo proposto para os serpentinitos da área de estudo. Modificado de Ruiz et al. (2018) com dados de Gurgel Santos et al. (em submissão).

7. Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq que forneceu recursos financeiros para as etapas de campo e análises químicas através do projeto número 1533695260888392 concedido ao MTOCN. À UFPE e ao IFRN também agradecemos por fornecer infraestrutura e ajuda logística. Ao CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) somos gratos pelo suporte financeiro ao PPGEIOC/UFPE (Programa de Pós Graduação em Geociências). F.G. Santos agradece ao Serviço Geológico do Brasil - CPRM pelo incentivo na busca do Mestrado em Geologia.

8. Referências

- ALMEIDA, F. F. M.; LEONARDOS, O. H.; VALENÇA, J. Review on granitic rocks of Northeast South America. In: *IUGS/UNESCO Symposium*, 1967, Recife, 41 p.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. **Earth-Science Reviews**, [s.l.], v. 17, p.1-29, 1981.
- ARNDT, N. T.; NISBET, E. G. What is a komatiite? In: ARNDT, N.T.; NISBET, E. G. **Komatiites**. Allen and Unwin, Concord Mass. 1982. p.19–28.
- ARTHAUD, M. H.; CABY, R.; FUCK, R. A.; DANTAS, E. L.; PARENTE, C. V. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. Geological Society, London, **Special Publications**, [s.l.], v. 294, n. 1, p. 49-67, jan. 2008.
- BICKLE, M.J.; FORD, C.E.; NISBET, E.G. The Petrogenesis of Peridotitic Komatiites: Evidence From High-Pressure Melting Experiments. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 37, p. 97-106, 1977.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: CORDANI, U.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Eds.). **Tectonic evolution of South America**. 31st International Geological Congress, 2000, Rio de Janeiro, p.151–182.
- CABY, R. Precambrian terranes of Benin-Nigeria and northeast Brazil and the Late Proterozoic south Atlantic fit. **Geological Society of America Special Papers**, [s.l.], v. 230, p.145-158, jan. 1989.
- CABY, R.; SIAL, A. N.; ARTHAUD, M.; VAUCHEZ, A. Crustal Evolution and the Brasiliano Orogeny in Northeast Brazil. **The West African Orogens And Circum-atlantic Correlatives**, [s.l.], p.373-397, jan. 1991.
- CAVALCANTE, R.; MEDEIROS, V. C.; COSTA, A. P.; SÁ, J. M.; SANTOS, R. V.; RODRIGUES, J. B.; DANTAS, A. R.; NASCIMENTO, M. A. L.; CUNHA, A. L. C. Neoproterozoic, Rhyacian and Neoproterozoic units of the Saquinho region, eastern Rio Piranhas-Seridó domain, Borborema Province (northeastern Brazil): implications for the stratigraphic model. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.11-29, abr. 2018.

- CONDIE, K.C. Magma Associations and Mantle Sources. In: CONDIE, K.C. (Ed.). **Plate Tectonics & Crustal Evolution**. 3ª Edição. Oxford: Pergamon. 1989. p. 208-243.
- DANTAS, E. L.; VAN SCHMUS, W. R.; HACKSPACKER, P. C.; FETTER, A. H.; BRITO NEVES, B. B.; CORDANI, U.; NUTMAN, A. P.; WILLIAMS, I. S. The 3.4–3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 130, n. 1-4, p.113-137, abr. 2004.
- DANTAS, E. L.; SOUZA, Z. S.; WERNICK, E.; HACKSPACKER, P. C.; MARTIN, H.; XIAODONG, D.; LI, J. W. Crustal growth in the 3.4–2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 227, p.120-156, abr. 2013.
- DELGADO, I. M.; SOUZA, J. D.; SILVA, L. C.; SILVEIRA FILHO, N. C.; SANTOS, R. A.; PEDREIRA, A. J.; GUIMARÃES, J. T.; ANGELIM, L. A. A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; LACERDA FILHO, J. V.; VALENTE, C. R.; PERROTA, M. M.; HEINECK, C. A. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. p.227-334.
- DOSTAL, J. Komatiites. **Geoscience Canada**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.21-31, mar. 2008.
- EVANS, B. W.; HATTORI, K.; BARONNET, A. Serpentinite: What, Why, Where?. **Elements**, [s.l.], v. 9, n. 2, p.99-106, 1 abr. 2013.
- GURGEL SANTOS, F.; NETO, M. T. O.; FERREIRA, V. P.; BERTOTTI, A. L. Eo to Paleoproterozoic Metamafic-ultramafic Rocks from the Central Portion of the Rio Grande do Norte Domain, Borborema Province, Northeast Brazil: The oldest South American Platform Rocks. **Journal of South American Earth Sciences**. Em submissão.
- HOLLANDA, M. H. B. M.; ARCHANJO, C. J.; BAUTISTA, J. R.; SOUZA, L. C. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 258, p.186-207, mar. 2015.
- JARDIM DE SÁ, E. F. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu Significado Geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan Africana. 1994. 803 pp. Tese

- (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 1994.
- JARDIM DE SÁ, E. F. Pre-Brasiliano Orogenic Evolution in the Serido Belt, NE Brazil; Conflicting Geochronological and Structural Data. **Revista Brasileira de Geociências**, [s.l.], v. 25, n. 4, p.307-314, 1995.
- JENSEN, L. S. A New Cation Plot for Classifying Subalkaline Volcanic Rocks. Ontario Division of Mines, **Miscellaneous Paper**, [s.l.], v. 66, p. 1-30. 1976.
- JESUS, B. A. **Rochas Máficas e Ultramáficas do Complexo Riacho da Telha, Maciço São José do Campestre, Província Borborema – NE do Brasil**. 2011. 80p Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2011.
- KERR, A. C.; ARNDT, N. T. A Note on the IUGS Reclassification of the High-Mg and Picritic Volcanic Rocks. **Journal of Petrology**, [s.l.], v. 42, n. 11, p.2169-2171, nov. 2001.
- Le BAS, M. J. IUGS Reclassification of the High-Mg and Picritic Volcanic Rocks. **Journal of Petrology**, [s.l.], v. 41, n. 10, p.1467-1470, 1 out. 2000.
- LIRA SANTOS, L. C. M. O Paleoproterozoico (2.3 a 1.6 Ga) do Terreno Alto Moxotó, Província Borborema: Significado e Implicações para o Gondwana Ocidental. 2012. 124 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2012.
- NASCIMENTO, M. A. L.; GALINDO, A. C.; MEDEIROS, V. C. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 58, p.281-299, mar. 2015.
- NEVES, S. P. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. **Tectonics**, [s.l.], v. 22, n. 4, p.1-13, 9 jul. 2003.
- NEVES, S. P. Atlantica revisited: new data and thoughts on the formation and evolution of a long-lived continent. **International Geology Review**, [s.l.], v. 53, n. 11-12, p.1377-1391, 8 fev. 2011.
- NEVES, S. P. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brazil): Widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 58, p.150-164, mar. 2015.

- NISBET, E.G. 1982. The Tectonic Setting and Petrogenesis of Komatiites. In: ARNDT, N.T.; NISBET, E. G. **Komatiites**. Allen and Unwin, Concord Mass. 1982. p. 501-526.
- PEARCE, T. H. A contribution to the Theory of Variation Diagrams. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 19, p. 142–157, 1968
- PEARCE, J. A. Chameical Variations in the Palisade Sill. **Journal of Petrology**, v. 2, n. 1, p. 15-32, 1970.
- PITOMBEIRA, J. P. A.; AMARAL, W. S.; FILHO, E. C. U.; FUCK, R. A.; DANTAS, E. L.; PARENTE, C. V.; COSTA, F. G.; VERISSIMO, C. U. V. Vestiges of a continental margin ophiolite type in the Novo Oriente region, Borborema Province, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 73, p.78-99, jan. 2017.
- RUIZ, F. V.; GIUSTINA, M. E. S. D.; OLIVEIRA, C. G.; DANTAS, E. L.; HOLLANDA, M. H. B. The 3.5 Ga São Tomé layered mafic-ultramafic intrusion, NE Brazil: Insights into a Paleoarchean Fe-Ti-V oxide mineralization and its reworking during West Gondwana assembly. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 326, p.462-478, jun. 2019.
- SANTIAGO, J. S. **Mineralização de Esmeralda Durante a Orogênese Brasileira no Nordeste do Brasil: O Caso do Depósito da Fazenda Bonfim, Estado Do Rio Grande do Norte**. 2017. 92p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2017.
- SANTIAGO, J. S.; SOUZA, V. S.; FILGUEIRAS, B. C.; JIMÉNEZ, F. A. C. Emerald from the Fazenda Bonfim Deposit, northeastern Brazil: chemical, fluid inclusions and oxygen isotope data. **Brazilian Journal of Geology**, [s.l.], v. 48, n. 3, p.457-472, 20 ago. 2018.
- SANTOS, E.J.; SOUZA NETO, J. A.; SILVA, M. R. R.; BEURLIN, H.; CAVALCANTI, J. A. D.; SILVA, M. G.; DIAS, V. M.; COSTA, A. F.; SANTOS, R. B. Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema. In: SILVA, M. G.; NETO, M. B. R.; JOST, H.; KUYUMIJAN, R. M. (Eds). **Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. p.343-388.
- SOUZA, Z. S.; MARTIN, H.; PEUCAT, J. J.; JARDIM DE SÁ, E. F.; MACEDO, M. H. F. Calc-Alkaline Magmatism at the Archean–Proterozoic Transition: the Caicó

- Complex Basement (NE Brazil). **Journal of Petrology**, [s.l.], v. 48, n. 11, p.2149-2185, 9 out. 2007.
- SOUZA, Z. S.; KALSBECK, F.; DENG, X. D.; FREI, R.; KOKFELT, T. F.; DANTAS, E. L.; LI, J. W.; PIMENTEL, M. M.; GALINDO, A. C. Generation of continental crust in the northern part of the Borborema Province, northeastern Brazil, from Archaean to Neoproterozoic. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 68, p.68-96, out. 2015.
- SOUZA NETO, J. A.; LEGRAND, J. M.; VOLFINGER, M.; PASCAL, M. L.; SONNET, P. W–Au skarns in the Neo-Proterozoic Seridó Mobile Belt, Borborema Province in northeastern Brazil: an overview with emphasis on the Bonfim deposit. **Mineralium Deposita**, [s.l.], v. 43, n. 2, p.185-205, 28 jul. 2007.
- SZILAS, K.; HINSBERG, V. J. V.; CREASER, R. A.; KIRSTERS, A. F. M. The geochemical composition of serpentinites in the Mesoarchaeon Tartoq Group, SW Greenland: Harzburgitic cumulates or melt-modified mantle? **Lithos**, [s.l.], v. 198-199, p.103-116, jun. 2014.
- UCHOA FILHO, E. C.; AMARAL, W. S.; PITOMBEIRA, J. P. A.; PARENTE, C. V. Petrografia da Sequência Metaultramáfica de Novo Oriente – CE: Vestígios de Um Ofiolito Transicional ou Uma Margem Passiva Pobre em Magma. **Revista de Geologia UFC**, Fortaleza, v. 27, n. 1, p.19-37, fev. 2014.
- VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; WILLIAMS, I. S.; HACKSPACKER, P. C.; FETTER, A. H.; DANTAS, E. L.; BABINSKI, M. The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U–Pb detrital zircon ages and Sm–Nd crustal residence (TDM) ages. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 127, n. 4, p.287-327, dez. 2003.
- VAN SCHMUS, W. R.; KOZUCH, M.; NEVES, B. B. B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Sm–Nd and U–Pb geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, [s.l.], v. 31, n. 2-3, p.227-252, mar. 2011.
- VILJOEN, M. J.; VILJOEN, R. P. The geology and geochemistry of the lower ultramafic unit of the Onverwacht Group and a proposed new class of igneous rocks. **Special Publications Geological Society of South Africa**, Cape Town, v. 2, p.55-85, jan. 1969.

- VILJOEN, M. J.; VILJOEN, R. P.; PEARTON, T. N. The Nature and Distribution of Archaean Komatiite Volcanics in South Africa In: ARNDT, N.T.; NISBET, E. G. **Komatiites**. Allen and Unwin, Concord Mass. 1982. p. 53-79.
- ZWAAN, J. C. et al. Emeralds from the Fazenda Bonfim Region, Rio Grande do Norte, Brazil. **Gems & Gemology**, [s.l.], v. 48, n. 1, p.2-17, 1 abr. 2012.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O estudo das rochas (meta) máficas-ultramáficas da parte central do Domínio Rio Grande do Norte mostrou que existem três tipos principais de rochas (serpentinitos, anfibólio-xistos e anfibolitos), e que estas apresentam um zoneamento metamórfico/metassomático. A dispersão observada nos gráficos litoquímicos corrobora com o fato de que as rochas estudadas tiveram a composição química original perturbada por terem sido submetidas à metamorfismo e metassomatismo. Anomalias positivas de U, Pb, Rb, Ba e Ta são observadas em diagramas de elementos incompatíveis normalizados em relação ao manto primitivo, que podem ser explicadas pela presença de um plutonismo expressivo na região, associado a implementação de zonas de cisalhamentos, sugerindo que fluidos magmáticos tenham interagido com as rochas estudadas.

Os serpentinitos aflorantes nas minas Serra Verde e Oiticica apresentam características de campo e petrográficas bastante similares, e mesmo analisando as concentrações de elementos maiores, menores e traços não é possível separá-los em dois grupos distintos, já que as análises químicas se sobrepõem, em todos os diagramas usados para caracterização geoquímica e classificação.

A composição química indica uma assinatura típica de komatiito para as rochas estudadas, e é compatível com temperatura/pressão altas e fusão parcial de uma fonte de manto peridotítico. Além disso, a forte influência das zonas de cisalhamento Santa Mônica, São Francisco e Serra Verde possibilita um caráter alóctone e embasa a ideia de que os corpos (meta) máficos-ultramáficos da área de estudo sejam parte de um *greenstone belt* desmembrado. Esta hipótese é reforçada pelo fato dessas rochas apresentarem composição química similar a outros corpos máficos-ultramáficos hospedados em *greenstone belts* arqueanos ao redor do mundo, sendo os serpentinitos de composição próxima às rochas encontradas no *greenstone belt* Umburanas (LEAL et al., 2015), os anfibólio-xistos análogos aos litotipos do *greenstone belt* de Crixás (ARNDT et al., 1989) e os anfibolitos se assemelhando às rochas máficas-ultramáficas encontradas em Kambalda e Kidd-Munro (LESHER et al., 1984; LESHER; ARNDT, 1995; SPROULE et al., 2002).

O Maciço São José do Campestre (MSJC) é um núcleo arqueano composto de ortognaisses com assinatura TTG posicionado a leste da zona de cisalhamento Picuí-João Câmara (ZCPJC) (DANTAS et al., 2004, 2013; SOUZA et al., 2015). Com o desenvolvimento das pesquisas, rochas de idade arqueanas de composições

variadas foram registradas também do lado oeste da ZCPJC, porém esses corpos ocorrem de forma isolada e em pequenas áreas, não sendo possível assim delimitar um “bloco arqueano” como ocorre no MSJC (Quadro 1).

Litotipos máficos-ultramáficos hospedados em greenstone belts de idade arqueana estão associados a importantes mineralizações em todo o mundo. As análises geocronológicas que foram realizadas em grãos de zircão recuperados dos serpentinitos das minas Oiticica e Serra Verde apresentaram idades de 3747 ± 12 Ma e 3526 ± 5.0 Ma (U-Pb/SHRIMP), respectivamente, e revelaram-se como o registro mais antigo de rochas (Era Eoarqueana) na Plataforma Sul-Americana. Apesar das mineralizações, que já são conhecidas na região desde a década de 1940, estarem relacionadas ao plutonismo Neoproterozoico e às zonas de cisalhamento associadas (NASCIMENTO et al., 2015; HOLLANDA et al., 2017), uma nova janela prospectiva se abre e associações minerais comuns em *greenstone belts* arqueanos podem ser descobertas com avanço dos estudos.

Quadro 1 – Ocorrência de rochas arqueanas no Domínio RGN da PB separados pela zona de cisalhamento Picuí-João Câmara.

Rocha	Unidade	Idade (Ma)	Era	Referência
Serpentinito	Embasamento Bonfim (?)	3747 ± 12	Eoarqueano	Gurgel Santos et al. (2019)
Serpentinito	Embasamento Bonfim (?)	3526 ± 5	Paleoarqueano	Gurgel Santos et al. (2019)
Ortognaisse	Intrusão São Tomé	3508 ± 16	Paleoarqueano	Ruiz et al. (2018)
Clinopiroxenito	Intrusão São Tomé	3506 ± 20	Paleoarqueano	Ruiz et al. (2018)
Ortognaisse granodiorítico	Complexo Granjeiro	2792 ± 8	Neoarqueano	Hollanda et al. (2015)
Metatufo máfico	Complexo Granjeiro	2590 ± 11	Neoarqueano	Ancelmi (2016)
Microaugen gnaisse	Complexo Saquinho	2512 ± 3	Neoarqueano	Cavalcante et al. (2018)
Metagabronorito	Complexo Saquinho	2501 ± 3	Neoarqueano	Cavalcante et al. (2018)
Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara				> Norte
Rocha	Unidade	Idade (Ma)	Era	Referência
Tonalito	Bom Jesus	3412 ± 8	Paleoarqueano	Dantas et al. (2004)
Granito	Serra Caiada	3393 ± 17	Paleoarqueano	Souza et al. (2015)
Granito	Serra Caiada	3356 ± 17	Paleoarqueano	Souza et al. (2015)
Tonalito	Brejinho	3333 ± 77	Paleoarqueano	Dantas et al. (2004)
Granito	Serra Caiada	3255 ± 4	Paleoarqueano	Dantas et al. (2004)
Tonalito	Brejinho	3178 ± 8	Mesoarqueano	Dantas et al. (2004)
Granito	São Pedro do Potengi	3118 ± 19	Mesoarqueano	Souza et al. (2015)
Gabro	Intrusão Riacho da Telha	3083 ± 17	Mesoarqueano	Jesus (2010)
Gabro	Senador Elói de Souza	3033 ± 3	Mesoarqueano	Dantas et al. (2004)
Granito	São José do Campestre	2685 ± 9	Neoarqueano	Dantas et al. (2004)

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M.; LEONARDOS, O. H.; VALENÇA, J. Review on granitic rocks of Northeast South America. *In: IUGS/UNESCO Symposium*, 1967, Recife, 41 p.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. **Earth-Science Reviews**, [S.l.], v. 17, p.1-29, 1981.
- ANCELMI, M. F. **Geocronologia e Geoquímica das Rochas Arqueanas do Complexo Granjeiro, Província Borborema**. 2016. 159p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.
- ANGELIM, L. A. A.; NESI, J. R.; TORRES, H. H. F.; MEDEIROS, V. C.; SANTOS, C. A.; VEIGA JUNIOR, J.; MENDES, V.A. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte** – Escala 1:500.000. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2006. p.233.
- ARNDT, N. T.; TEIXEIRA, N. A.; WHITE, W. M. Bizarre geochemistry of komatiites from the Crixás greenstone belt, Brazil. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, [s.l.], v. 101, n. 2, p.187-197, fev. 1989.
- ARTHAUD, M. H.; CABY, R.; FUCK, R. A.; DANTAS, E. L.; PARENTE, C. V. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. Geological Society, London, **Special Publications**, [S.l.], v. 294, n. 1, p.49-67, jan. 2008.
- BARBOSA, J. S. F.; SABATÉ, P. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. **Precambrian Research**, [S.l.], v. 133, n. 1-2, p.1-27, ago. 2004.
- BOWRING, S.; HOUSH, T. The Earth's Early Evolution. **Science**, [S.l.], v. 269, n. 5230, p.1535-1540, 15 set. 1995.
- BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: CORDANI, U.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Eds.). **Tectonic evolution of South America**. 31st International Geological Congress, 2000, Rio de Janeiro, p.151–182.
- CABY, R. Precambrian terranes of Benin-Nigeria and northeast Brazil and the Late Proterozoic south Atlantic fit. **Geological Society of America Special Papers**, [S.l.], v. 230, p.145-158, jan. 1989.

CAVALCANTI NETO, M. T. O.; BARBOSA, R. V. N. As Esmeraldas De Lajes, Caiçara Do Rio Dos Ventos e São Tomé/RN. **Holos**, [S.l.], v. 2, p.92-104, 19 mar. 2007.

CONDIE, K. C. **Archean Greenstone Belts**. Amsterdam: Elsevier, 1981. 435pp.
COSTA, A. P.; DANTAS, A. R. Programa Geologia do Brasil-PGB. **Lajes. Folha SB.24-X-D-VI**. Estado do Rio Grande do Norte. Carta Geológica e de Recursos Minerais. Recife: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2014. 1 mapa colorido. Escala 1:100.000. 90x70 cm.

COSTA, A. P.; DANTAS, A. R. Programa Geologia do Brasil-PGB. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Lajes SB.24-X-D-VI: Estado do Rio Grande do Norte**. Escala 1:100.000. Recife: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2018. 163p.

COSTA, A. P.; DANTAS, A. R.; CUNHA, A. L. C.; CAVALCANTE, R.; SPISILA, A. L.; LIMA, R. B. Avaliação dos Recursos Minerais do Brasil. **Projeto ARIM Seridó – FOLHAS SB.24-Z-B-II-1 e SB.24-Z-B-II-3 (PARTES) - DISTRITO DE BONFIM: Estado do Rio Grande do Norte**. Mapa Geológico-Geofísico. Recife: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2018. 1 mapa colorido. Escala 1:50.000. 75x74 cm.

COSTA, F. G. **Geologia e Metalogênese do Ouro do Greenstone Belt da Serra das Pipocas, Maciço De Troia, Província Borborema, NE–Brasil**. 2018. 239p. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

COSTA, P. E. M. **Caracterização Petrográfica de Litogeoquímica de Elementos Maiores de Rochas Metaultramáficas-máficas e Ferruginosas Bandadas de uma Área a NW de São Tomé/RN**. 2012. 57p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

DANTAS, E. L.; VAN SCHMUS, W. R.; HACKSPACKER, P. C.; FETTER, A. H.; BRITO NEVES, B. B.; CORDANI, U.; NUTMAN, A. P.; WILLIAMS, I. S. The 3.4–3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. **Precambrian Research**, [S.l.], v. 130, n. 1-4, p.113-137, abr. 2004.

DANTAS, E. L.; SOUZA, Z. S.; WERNICK, E.; HACKSPACKER, P. C.; MARTIN, H.; XIAODONG, D.; LI, J. W. Crustal growth in the 3.4–2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. **Precambrian Research**, [S.l.], v. 227, p.120-156, abr. 2013.

FERREIRA, A. C. D. **Intrusões Máficas-Ultramáficas do Domínio Rio Grande do Norte, Província Borborema: Ambiente Tectônico e Potencial para Depósitos Magmáticos**. 2015. 73 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília Brasília, 2015.

FERREIRA, C. A.; SANTOS, E. J. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. **Jaguaribe SE. Folha SB. 24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco**. Geologia e Metalogênese. Recife: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2000. 1 CD ROM. Escala 1: 500.000.

HOLLANDA, M. H. B. M.; ARCHANJO, C. J.; BAUTISTA, J. R.; SOUZA, L. C. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. **Precambrian Research**, [S.l.], v. 258, p.186-207, mar. 2015.

HOLLANDA, M. H. B. M.; SOUZA NETO, J. A.; ARCHANJO, C. J.; STEIN, H.; MAIA, A. C. S. Age of the Granitic Magmatism and the W-Mo Mineralization in Skarns of the Seridó Belt (NE Brazil) Based on Zircon U-Pb (SHRIMP) and Molybdenite Re-Os dating. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 79, p.1-11, nov. 2017.

JARDIM DE SÁ, E. F. **A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu Significado Geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan Africana**. 1994. 803 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1994.

JARDIM DE SÁ, E. F. Pre-Brasiliano Orogenic Evolution in the Serido Belt, NE Brazil; Conflicting Geochronological and Structural Data. **Revista Brasileira de Geociências**, [S.l.], v. 25, n. 4, p.307-314, 1995.

JESUS, B. A. **Rochas Máficas e Ultramáficas do Complexo Riacho da Telha, Maciço São José do Campestre, Província Borborema – NE do Brasil**. 2011. 80p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

LEAL, A. B. M.; SANTOS, A. L. D.; BASTOS LEAL, L. R.; CUNHA, J. C. Geochemistry of Contaminated Komatiites from the Umburanas Greenstone Belt, Bahia State, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 61, p.1-13, ago. 2015.

LESHER, C. M.; ARNDT, N. T. REE and Nd Isotope Geochemistry, Petrogenesis And Volcanic Evolution of Contaminated Komatiites at Kambalda, Western Australia. **Lithos**, [S.l.], v. 34, n. 1-3, p.127-157, jan. 1995.

LESHER, C. M.; ARNDT, N. T.; GOVES, D. I. Genesis of komatiite-associated nickel sulphide deposits at Kambalda, Western Australia: a distal volcanic model. In: BUCHANAN, D. L.; JONES, M. J. (Eds). **Sulphide Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks**. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1984. p. 70-80.

MARTIN, H.; PEUCAT, J. J.; SABATÉ, P.; CUNHA, J. C. Crustal evolution in the early Archaean of South America: example of the Sete Voltas Massif, Bahia State, Brazil. **Precambrian Research**, [s.l.], v. 82, n. 1-2, p.35-62, mar. 1997.

MEDEIROS, V. C.; CAVALCANTE, R.; CUNHA, A. L. C.; DANTAS, A. R.; COSTA, A. P.; BRITO, A. A.; RODRIGUES, J. B.; SILVA, M. A. O Furo Estratigráfico de Riacho Fechado (Currais Novos/RN), Domínio Rio Piranhas-Seridó (Província Borborema, NE Brasil): Procedimentos e Resultados. *Estudos Geológicos*, [S.I.], v. 27, n. 3, p.1-40, 5 dez. 2017. **Estudos Geológicos**.

NASCIMENTO, M. A. L.; GALINDO, A. C.; MEDEIROS, V. C. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.I.], v. 58, p.281-299, mar. 2015.

NEVES, S. P. Atlantica revisited: new data and thoughts on the formation and evolution of a long-lived continent. **International Geology Review**, [s.l.], v. 53, n. 11-12, p.1377-1391, 8 fev. 2011.

NEVES, S. P. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brazil): Widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.I.], v. 58, p.150-164, mar. 2015.

RANIER DANTAS, A. **Petrografia e Litoquímica de Rochas Ferríferas na Região Central do Estado do Rio Grande do Norte (Domínio Rio Piranhas-Seridó, NE da Província Borborema)**. 2017. 170p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

RUIZ, F. V.; GIUSTINA, M. E. S. D.; OLIVEIRA, C. G.; DANTAS, E. L.; HOLLANDA, M. H. B. The 3.5 Ga São Tomé layered mafic-ultramafic intrusion, NE Brazil: Insights into a Paleoarchean Fe-Ti-V oxide mineralization and its reworking during West Gondwana assembly. **Precambrian Research**, [S.I.], v. 326, p.462-478, jun. 2019.

SANTIAGO, J. S. **Mineralização de Esmeralda Durante a Orogênese Brasileira no Nordeste do Brasil: O Caso do Depósito da Fazenda Bonfim, Estado Do Rio Grande do Norte**. 2017. 92p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília Brasília, 2017.

SANTIAGO, J. S.; SOUZA, V. S.; FILGUEIRAS, B. C.; JIMÉNEZ, F. A. C. Emerald from the Fazenda Bonfim Deposit, northeastern Brazil: chemical, fluid inclusions and oxygen isotope data. **Brazilian Journal of Geology**, [S.I.], v. 48, n. 3, p.457-472, 20 ago. 2018.

SILVA, F. C. A.; CHAUVET, A.; FAURE, M. General Features of the Gold Deposits in the Rio Itapicuru Greenstone Belt (Rigb, Ne Brazil), Discussion of the Origin, Timing and Tectonic Model. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 3, n. 28, p.377-390, set. 1998.

SOUZA, Z. S.; MARTIN, H.; PEUCAT, J. J.; JARDIM DE SÁ, E. F.; MACEDO, M. H. F. Calc-Alkaline Magmatism at the Archean–Proterozoic Transition: the Caicó Complex Basement (NE Brazil). **Journal of Petrology**, [s.l.], v. 48, n. 11, p.2149-2185, 9 out. 2007.

SOUZA, Z. S.; KALSBECK, F.; DENG, X. D.; FREI, R.; KOKFELT, T. F.; DANTAS, E. L.; LI, J. W.; PIMENTEL, M. M.; GALINDO, A. C. Generation of continental crust in the northern part of the Borborema Province, northeastern Brazil, from Archaean to Neoproterozoic. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 68, p.68-96, out. 2015.

SPROULE, R. A.; LESHER, C. M.; HOULÉ, M. G.; KEAYS, R. R.; AYER, J. A.; THURSTON, P. C. Spatial and temporal variations in the geochemistry of komatiites and komatiitic basalts in the Abitibi greenstone belt. **Precambrian Research**, [S.l.], v. 115, n. 1-4, p.153-186, maio 2002.

VAN SCHMUS, W. R.; KOZUCH, M.; NEVES, B. B. B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: Insights from Sm–Nd and U–Pb geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 31, n. 2-3, p.227-252, mar. 2011.

VAUCHEZ, A.; NEVES, S.; CABY, R.; CORSINI, M.; EGYDIO-SILVA, M.; ARTHAUD, M.; AMARO, V. E. The Borborema shear zone system, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 8, n. 3-4, p.247-266, jul. 1995.

APÊNDICE A - TABELA DE AFLORAMENTOS

AFLORAMENTO	COORDENADAS			DESCRIÇÃO
	UTM Y	UTM X	ZONA	
AM-7C	9349484	819320.8	24M	Serpentinito
STB-03-1	9349492	819336	24M	Serpentinito
STB-03C	9349492	819336	24M	Dolomita Serpentinito
STB-03D	9349492	819336	24M	Serpentinito
STC-14C2	9349658	819341	24M	Serpentinito
STE-14	9353426	819232	24M	Serpentinito
STE-14B	9353426	819232	24M	Serpentinito
AM-1A	9367666	825668	24M	Clorita Talco Xisto
AM-5C	9360523	822079	24M	Talco Xisto
STD-20	9337660	809581	24M	Tremolita Xisto
STE-19A	9364604	822527	24M	Biotita-Tremolita-Actinolita Xisto
STF-47C	9358992	825306	24M	Tremolita Xisto
STB-03A	9349492	819336	24M	Tremolita-ferroactinolita Xisto
STD-22	9337698	809603	24M	Tremolita-Actinolita Xisto
STD-60-1	9334380	814011	24M	Tremolita-Actinolita Xisto
STD-60A	9334380	814011	24M	Tremolitito
STE-18	9356254	819176	24M	Tremolitito
STE-28E	9352922	817733	24M	Tremolita Xisto

ANEXO A - CARTAS DE SUBMISSÃO

Journal of South American Earth Sciences

Assunto: Successfully received: Eo-Paleoarchean Meta mafic-ultramafic Rocks from the Central Portion of the Rio Grande do Norte Domain, Borborema Province, Northeast Brazil: The oldest South American Platform rocks for Journal of South American Earth Sciences

De: EviseSupport@elsevier.com

Para: frank.santos@cprm.gov.br

Responder para: sames@elsevier.com

Data: segunda, 01 de julho de 2019 11:46 BRT

This message was sent automatically.

Ref: SAMES_2019_268

Title: Eo-Paleoarchean Meta mafic-ultramafic Rocks from the Central Portion of the Rio Grande do Norte Domain, Borborema Province, Northeast Brazil: The oldest South American Platform rocks

Journal: Journal of South American Earth Sciences

Dear Mr. Santos,

Thank you for submitting your manuscript for consideration for publication in Journal of South American Earth Sciences. Your submission was received in good order.

To track the status of your manuscript, please log into

EVISE® at: http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NavController.jspx?J_RNL_ACR=SAMES and locate your submission under the header 'My Submissions with Journal' on your 'My Author Tasks' view.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Journal of South American Earth Sciences

Have questions or need assistance?

For further assistance, please visit our Customer Support site. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about EVISE® via interactive tutorials. You can also talk 24/5 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

Copyright © 2018 Elsevier B.V. | Privacy Policy

Elsevier B.V., Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, The Netherlands, Reg. No. 33156677.



Rio de Janeiro, 24 de julho de 2019.

DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que o manuscrito **Serpentinitos da Porção Central do Domínio Rio Grande do Norte, Província Borborema, Nordeste do Brasil: Petrologia e Geoquímica**, de autoria de Frank Gurgel Santos, Mario Tavares de Oliveira Cavalcanti Neto, Valderéz Pinto Ferreira e Anelise Losangela Bertotti, foi submetido para publicação no Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ em 23/07/2019.

Claudine Pereira Dereczynski
Editora Associada
Anuário do Instituto de Geociências