



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências**

**CARACTERIZAÇÃO, GÊNESE E CORRELAÇÃO
ESTRATIGRÁFICA DOS FOSFORITOS DA REGIÃO DE
COROMANDEL - MG**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 431

LUCAS SANTOS BATISTA TELES

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS

Brasília, Janeiro de 2019.



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências**

CARACTERIZAÇÃO, GÊNESE E CORRELAÇÃO ESTRATIGRÁFICA DOS FOSFORITOS DA REGIÃO DE COROMANDEL-MG

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUCAS SANTOS BATISTA TELES

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos – Orientador
(Instituto de Geociências/ Universidade de Brasília – IG/UnB)

Profa. Dra. Edi Mendes Guimarães
(Instituto de Geociências/ Universidade de Brasília – IG/UnB)

Prof. Dr. Alexandre Uhlein
(Instituto de Geociências/ Universidade Federal de Minas Gerais – IG/UFMG)

Área de Concentração:

Prospecção e Geologia Econômica

Brasília, Janeiro de 2019.

AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação somente foi possível graças a participação efetiva de uma série de pessoas e instituições. Sendo assim, gostaria de demonstrar minha eterna gratidão:

- Aos meus pais, família e namorada pelo carinho, compreensão e suporte;
- Ao grande amigo e orientador José Eloi Guimarães Campos pela oportunidade de trabalho e pelas exaustivas horas de dedicação, ensinamentos e paciência;
- À CAPES pelo inestimável apoio financeiro;
- A todos os professores, técnicos de laboratórios e funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pelo trabalho de excelência, em especial àqueles dos laboratórios diretamente envolvidos na presente dissertação;
- À Universidade de Brasília por ser o melhor lugar do mundo;
- Ao pessoal da sala A1-294/8, em especial a amiga Ana Tayla pelas infinitas discussões geológicas e conselhos;
- A todos os meus amigos de vida e de curso que sempre foram presentes nos momentos de necessidade e que são a minha maior preciosidade;
- A todos os moradores da gloriosa cidade de Coromandel - MG, em especial aos responsáveis pelos hotéis Alemão e Rodoviário, além dos funcionários do Bar do Eládio.

Enfim, o mais sincero e profundo obrigado a todos que de alguma forma ajudaram nesses últimos anos e que fizeram toda a diferença.

"Ser geólogo é falar com propriedade em bilhões de anos como se fossem dias, em mares que já se foram, em ambientes que não mais existem"

Pedro Jacobi

RESUMO

O depósito de fosfato de Coromandel situa-se no oeste do Estado de Minas Gerais e ocorre inserido no contexto geológico da porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília, mais precisamente na Formação Retiro, base do Grupo Vazante. Esse depósito é caracterizado pela presença das fácies de siltitos fosfatados, fosforitos laminados e fosforitos brechados que apresentam teores de P_2O_5 variando entre 2 a 34%.

Essas rochas fosfatadas ocorrem intrinsecamente relacionadas a diamictitos polimíticos, arenitos conglomeráticos polimíticos e arenitos arcoseanos finos esbranquiçados depositados sob influência glaciogênica, imprimindo controle no acúmulo anômalo de fosfato. A instalação de um ambiente glaciotransicional, no qual as rochas rudáceas foram depositadas, seria responsável pela geração das condições de alcalinidade, temperatura e oxirredução propícias para a precipitação química direta de colofanita. Em adição, a baixa temperatura da água decorrente dos episódios de degelo, funcionava como uma limitação ao desenvolvimento de organismos metabolizadores de fósforo, o que resulta no enriquecimento do sistema em P_2O_5 .

Tais parâmetros físico-químicos primordiais à precipitação fosfática somente foram alcançados devido a característica restrita do ambiente genético da Formação Retiro. O contexto lagunar, por sua vez, é totalmente vinculado a fisiografia complexa da bacia Vazante, onde ocorre a intercalação entre ambientes marinhos de águas rasas e profundas.

A correlação estratigráfica com rochas glaciogênicas, os litotipos das fácies fosfatadas, os teores de P_2O_5 , além da maior complexidade da assembleia mineralógica e o discreto vínculo geomorfológico distanciam o modelo metalogenético do depósito da Formação Retiro dos demais existentes na Faixa Brasília. Desta forma, essas características peculiares permitem a proposição de um modelo metalogenético individual do “Tipo Coromandel” para as rochas fosfatadas da Formação Retiro.

Em consequência a essas características específicas do depósito “Tipo Coromandel” existem na área de estudo vetores exploratórios que apontam para a proximidade da ocorrência das rochas fosfatadas, incluindo a presença de rochas rudáceas, serras de silexitos, pelitos laminados amarelados, geralmente bastante pedogenizados e intensamente vegetados, além da forte associação com elementos traço, em especial o urânio e o tório, que resultam em anomalias de gamaespectrometria.

Palavras-chave: Fosfato Sedimentar, Formação Retiro, Grupo Vazante, Depósito Tipo Coromandel.

ABSTRACT

The Coromandel phosphate deposit is located in western of Minas Gerais State, Brazil, inserted in the southern portion of the Brasília Fold Belt geological context, more precisely in the Retiro Formation, bottom of the Vazante Group. This deposit is characterized by the presence of phosphated siltstone, laminated and brecciated phosphorites with P_2O_5 contents ranging from 2 to 34%.

These phosphate rocks occur intrinsically related to polymictic diamictites, conglomeratic sandstones, and fine whitish arkose sandstones that suggest glacial influence on the anomalous phosphate accumulation. The installation of a glaciotransitional environment, in which the rudaceous rocks were deposited, would be responsible for the generation of alkalinity, temperature and oxirreduction conditions to the direct chemical precipitation of colofanite. In addition, the cold water resulting from ice melting episodes becomes a limitation factor for phosphorus metabolizing organism development, which results in the system enrichment in P_2O_5 .

These physical-chemical parameters to the phosphate precipitation were only reached due to the restrictive characteristics of the depositional environment of the Retiro Formation. The lagoon context, in its turn, is totally linked to the complex physiography of the Vazante basin, where there is the interleaving of shallow and deep water marine environments.

The stratigraphic correlation with glaciogenic rocks, the occurrence of phosphate lithotypes facies, P_2O_5 contents, complexity of mineralogical assembly and the discrete geomorphological link, pull away the metalogenetic model of the Retiro Formation from the others existing in the Brasília Belt. Thus, these peculiar characteristics allow the proposition of the “Coromandel Type” metalogenetic model for the phosphate rocks of the Retiro Formation.

Because of these specific characteristics of the Coromandel Type deposits, the study area shows exploratory vectors that point out to the proximity of the occurrence of phosphate rocks, including the presence of rudaceous glaciogenic rocks, silexite hills and yellowish laminated shale usually with thick intensely vegetated pedogenic surfaces, in addition to the strong association to trace elements, especially uranium and thorium, that results in gamma spectrometry anomalies.

Keywords: Sedimentary Phosphate, Retiro Formation, Vazante Group, Coromandel Deposit Type.

SUMÁRIO

RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XI
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 O GRUPO CANASTRA.....	7
2.3 O GRUPO VAZANTE.....	8
2.4 O GRUPO BAMBUÍ.....	12
2.5 CONTROVÉRSIAS ESTRATIGRÁFICAS.....	14
CAPÍTULO 3 - GEOLOGIA DAS FÁCIES TERRÍGENAS DA FORMAÇÃO RETIRO.....	16
3.1 ESTRATIGRAFIA DA FORMAÇÃO RETIRO.....	16
3.2 CONDIÇÕES DEPOSICIONAIS.....	26
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DAS FÁCIES FOSFATADAS.....	29
4.1 SILTITOS FOSFATADOS.....	29
4.2 FOSFORITOS LAMINADOS.....	33
4.3 FOSFORITOS BRECHADOS.....	37
4.4 FOSFOGÊNESE.....	40
CAPÍTULO 5 - DISCUSSÕES.....	43
5.1 ESTRATIGRAFIA REGIONAL.....	43
5.2 EVOLUÇÃO DA BACIA VAZANTE.....	46
5.3 COMPARAÇÃO DOS DEPÓSITOS DE FOSFATO SEDIMENTAR DA FAIXA BRASÍLIA.....	53
5.4 VETORES EXPLORATÓRIOS.....	59
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo e suas principais vias de acesso partindo da cidade de Brasília-DF.....	4
Figura 2.1 - Coluna estratigráfica do Grupo Canastra compilada de Dardenne (2000).....	9
Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Grupo Vazante compilada de Dardenne (2000).....	10
Figura 2.3 - Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí definida por Dardenne (1978).....	13
Figura 3.1 - (A) Diamictito com seixos de litoclastos pelíticos com cerca de 1,5 cm de comprimento imersos em meio a matriz de granulometria areia fina. (B) Diamictito com bloco de rocha granítica alterada com cerca de 50 cm de comprimento em meio a matriz pelítica. (C) Diamictito com cavidades de seixos fantasmas geradas por provável dissolução de carbonatos. (D) Arenito conglomerático com seixo isolado de quartzito arredondado com cerca de 4 cm de diâmetro.....	17
Figura 3.2 - (A) Bloco bem arredondado de quartzito, com comprimento de aproximadamente 20 cm, constituinte do arcabouço do diamictito. (B) Estrias de arrasto (marcadas pelo pontilhado vermelho) na lateral facetada de fragmento de matacão de quartzito do tipo “ <i>iron flats</i> ”. Importante notar que essas linhas destoam dos planos de acamamento (marcados pelo pontilhado preto) e dos planos de fratura, além de truncar de forma oblíqua as linhas de intersecção entre o plano lateral e o acamamento do fragmento.....	18
Figura 3.3 - (A) Fotomicrografia de diamictito com arcabouço constituído por grãos de quartzo com diferentes graus de arredondamento e esfericidade (Qan = grão de quartzo anguloso, Qar= grão de quartzo anguloso (N//, 1.25x). (B) Litoclasto pelítico disposto na forma de pseudomatriz. (Qtz = quartzo, Pm = pseudomatriz, M= matriz) (N//, 1,25x).....	19
Figura 3.4 - Fotomicrografia de diamictito mostrando litoclasto dolomítico com cerca de 2,5 mm de comprimento cercado por borda de recristalização carbonática. (Qtz = quartzo, Lc = litoclasto, Cc = carbonato, M = matriz) (N//, 1.25x).....	20
Figura 3.5 – (A) Fotomicrografia de arenito conglomerático evidenciando a predominância dos grãos de quartzo com tamanho entre 0,12mm e 0,2mm. Nota-se que os grãos de quartzo possuem diferentes graus de arredondamento e angulosidade (Qan = grão de quartzo anguloso, Qar = grão de quartzo arredondado, Lc = litoclasto) (N// 1,25x). (B) Fotomicrografia da textura conglomerática dos arenitos onde se observam novamente diferentes granulometrias e forma de grãos. (Qan = grão de quartzo anguloso, Qar = grão de quartzo arredondado, M = Matriz) (N// 4x).....	21
Figura 3.6 - (A) Afloramento rasteiro de arenito arcoseano fino esbranquiçado suavemente dobrado. (B) Detalhe de exposição de arenito arcoseano esbranquiçado mostrando o acamamento sedimentar primário de espessura decimétrica.....	22
Figura 3.7 - (A) Fotomicrografia de arenito fino da Formação Retiro salientando a grande presença de grãos de quartzo no arcabouço. (NX 1,25x) (B) Fotomicrografia de arenito fino mostrando a tendência granulométrica (0,15mm), selecioneamento moderado e formato subanguloso dos grãos de quartzo. (NX 4x).....	23

Figura 3.8 - (A) Pelito intemperizado de coloração amarelo avermelhada apresentando estratificação plano-paralela, onde as camadas apresentam espessura média aproximada de 4 cm. (B) Detalhe de pelito avermelhado mais preservado de intemperismo, na qual se observa o caráter maciço das camadas plano paralelas.....	24
Figura 3.9 - (A) Pelito arroxeadado intensamente laminado predominante na associação de fácies pelito variado. (B) Intercalação entre finas laminações milimétricas de pelito amarelo pálido (rochas alterada) e pelitos mais escuros (rocha mais fresca).....	25
Figura 3.10 - Coluna estratigráfica integrada de um ciclo deposicional da Formação Retiro. É importante salientar que este empilhamento se repete vertical e lateralmente.....	25
Figura 3.11 - Bloco diagrama representando os sistemas deposicionais da Formação Retiro. O bloco A mostra a sequência deposicional das rochas que possuem aspectos genéticos diretamente relacionados à geleira terminal, enquanto B retrata às sequências formadas a partir da transgressão marinha gerada pela deglaciação.....	28
Figura 4.1 - (A) Amostra de silito fosfatado de coloração predominantemente escura com domínios de coloração esbranquiçada. (B) Reação do silito fosfatado ao Molibdato de Amônia, importante notar a concentração do produto esverdeado da reação nas porções mais ricas em lâminas de fosfolutito.....	30
Figura 4.2 - (A) Afloramento alterado de silitos fosfatados que adquirem coloração acinzentada e não apresentam reação ao Molibdato de Amônia. (B) Silitos fosfatados alterados com coloração amarelada e pouca reação ao Molibdato de Amônia.....	31
Figura 4.3 - Silito argiloso, calcífero (marga), de coloração escura (preta) homogêneo com fraca reação ao Molibdato de Amônia.....	32
Figura 4.4 - (A) Fotomicrografia de silito fosfatado mostrando o arranjo das lâminas de fosfolutito em meio a porção pelítica. Destaca-se ao centro o intraclastos pelítico com bordas de fosfolutito (IC = Intraclasto, F = Fosfolutito) (N// 1,25x). (B) Detalhe das lâminas de fosfolutito. (F = Fosfolutito) (N// 4x).....	33
Figura 4.5 - Difratograma de Raios X representativo da mineralogia dos silitos fosfatados. Importante notar a presença de fluorapatita como mineral de fosfato. (aq = Aquecida, g = Glicolada, n = Normal, tot = Total).....	34
Figura 4.6 - (A) Blocos de fosforito laminados onde observa-se a intercalação entre lâminas claras e escuras. No bloco localizado à direita da imagem ocorre uma porção amarelada resultado da reação da rocha ao Molibdato de Amônia. (B) Fosforito laminado intensamente alterado, nesse estágio, os minerais fosfáticos já foram totalmente lixiviados, porém as estruturas são preservadas.....	35
Figura 4.7 - (A) Fotomicrografia do aspecto geral dos fosforitos laminados ressaltando a intercalação entre os fosfolutitos e as lâminas de fosfarenito (FosA = fosfarenito, FosLu = fosfolutito) (N// 1,25x). (B) Detalhe da porção de fosfarenito mostrando a dominância de fosfointraclastos com tamanho e formas variadas (FosIC = Fosfointraclasto) (N// 4x).....	36
Figura 4.8 - Fotomicrografia de finos cristais de wavellita preenchendo poros e fraturas da porção fosfarenítica dos fosforitos laminados (NX 4x).....	37

Figura 4.9 - Difratoograma representativo da assembleia mineralógica dos fosforitos laminados. Importante notar que além de fluorapatitas, também estão presentes wavellitas (aq = Aquecida, G = Glicolada, tot = Total).....	37
Figura 4.10 - (A) Aspecto macroscópico de fosforito brechado. Nas porções mais claras, notam-se a presença de nódulos formados durante a etapa de pedogênese. (B) Reação proeminente da matriz de fosforito brechado ao Molibdato de Amônia.....	38
Figura 4.11 - (A) Fotomicrografia de fosforito brechado mostrando a articulação entre a matriz de fosfolutitos, de cor acastanhada, e dos domínios preenchidos por sílica (N// 1,25x). (B) Detalhe das porções silicosas evidenciando a presença de bordas abruptas e bem definidas entre esses domínios e da matriz fosfática (NX 1,25x).....	39
Figura 4.12 - Difratoograma representativo dos fosforitos brechados. Importante notar a forma dos picos das fluorapatitas.....	40
Figura 4.13 - (A) Aspecto brechado geral dos silexitos da Formação Retiro. (B) Detalhe das concreções silicosas que sugerem a substituição completa de blocos de rochas carbonáticas por sílica.....	40
Figura 4.14 - Gráfico modificado de Pufahl & Groat (2016) mostrando a relação entre a abundância dos depósitos de fosfatos no intervalo entre o Neoproterozoico e o Cenozoico. Ressalta-se o pico da transição Proterozoico/Cambriano. (4 - Glaciação neoproterozoica, 5 - Glaciação ordoviciana, 6 - Glaciação permiana, 7 - Glaciação neogênica, CE - Explosão da vida cambriana, NOE - Evento de Oxidação neoproterozoico).....	42
Figura 5.1 - (A) Único afloramento de rocha carbonática da área de estudo, onde observa-se a ocorrência de bloco de calcário micrítico escuro. (B) Detalhe do bloco mostrando aspecto micrítico e laminação plano paralela dobrada no calcário.....	45
Figura 5.2 - Esquema simplificado representando a possível paleogeografia da bacia Vazante e a relação lateral entre as unidades. Detalhe para a Formação Serra do Poço Verde, na qual as taxas de subsidência contínuas permitiram a deposição de espessa sucessão carbonática de águas rasas.....	50
Figura 5.3 - Mapa geológico simplificado elaborado na escala de 1:1.000.000, modificado de Bizzi <i>et al.</i> , (2004), mostrando a variação cartográfica das unidades do Grupo Vazante. Nota-se também a inserção do Grupo Quilombo, unidade proposta por Moura (2018) e o refinamento dos grandes contatos do Grupo Canastra.....	52
Figura 5.4 - Perfis esquemáticos retirados de Monteiro (2009) mostrando a forte correlação entre as diferentes fácies de rochas fosfatadas da Formação Sete Lagoas e os vales dos paleocanais do embasamento granítico.....	54
Figura 5.5 - Modelo fosfogenético proposto para os depósitos do Grupo Vazante. A deposição dos fosfatos da Formação Retiro se dá em possível ambiente marinho raso alimentado por fósforo de fontes continentais, com influência direta da glaciação na geração das condições ambientais necessárias para a precipitação dos fosfatos. Ao contrário, os depósitos associados à Formação Rocinha têm origem do fósforo a partir de complexos de fosfatos dissolvidos em águas profundas com deposição em condições marinhas lagunares sob lâmina d'água e condições físico-químicas específicas.....	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Tabela de relação entre as fácies observadas e seus respectivos sistemas deposicionais.....	29
Tabela 4.1 - Óxidos, em porcentagem, dos elementos maiores das rochas fosfatadas. Importante notar as concentrações de P_2O_5 das três fácies distintas. (Azul - Siltitos Fosfatados, Verde - Fosforitos laminados, Vermelho - Fosforitos Brechados).....	42
Tabela 5.1 - Aspectos utilizados para a diferenciação entre as rochas dos grupos Bambuí e Vazante.....	45
Tabela 5.2 - Principais aspectos comparativos entre os depósitos de fosfato sedimentar da Faixa Brasília.....	57

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Devido à crescente necessidade de insumos fosfatados para uso em atividades agrícolas, o conhecimento de rochas fosfatadas tem avançado consideravelmente tanto nos aspectos genético-prospectivos, quanto econômicos. O estudo e caracterização das ocorrências dessas rochas são fundamentais para a descoberta de novos depósitos e na determinação da viabilidade das ocorrências já conhecidas.

Rochas fosfatadas são utilizadas em grandes volumes no Brasil, país reconhecidamente agrícola, devido à sua importância econômica na indústria de fertilizantes. No entanto, o país ainda apresenta dependência externa desse insumo, pois apesar da crescente demanda da produção pela indústria de fertilizantes, observa-se que a extração de rochas fosfáticas não acompanha o crescimento, provocando a sobrevalorização do minério (Fonseca & Silva, 2014).

Cerca de 80% das rochas fosfáticas exploradas no Brasil são de origem ígnea, associadas a complexos alcalino-carbonatíticos, geralmente situados ao longo do azimute 125° (Souza, 2001). Entretanto, o potencial para depósitos sedimentares, associados às bacias proterozoicas carece de estudos mais específicos para avaliar a real potencialidade dessas áreas dentro do cenário nacional de produção.

No fim dos anos 2000, um depósito pouco convencional de rocha fosfatada de baixo teor (siltitos fosfatados) foi viabilizado na região limítrofe entre os estados de Goiás e Tocantins (municípios de Campos Belos e Arraias) levantando assim, mais uma possibilidade de fosfato sedimentar em contexto geológico específico, base do Grupo Bambuí (Monteiro, 2009).

Dentre os depósitos sedimentares de fosfato associados às bacias proterozoicas brasileiras, destacam-se os inseridos no contexto geológico da porção externa da Faixa de Dobramentos Brasília, em especial, os distribuídos pelos estados de Minas Gerais e Goiás, hospedados em rochas dos Grupos Vazante e Bambuí.

Na literatura do Grupo Vazante são descritos dois grupos de depósitos distintos, diretamente associados às rochas das Formações Retiro e Rocinha. O depósito da Formação Retiro foi primeiramente identificado por Barbosa *et al.* (1970), porém melhor detalhado e quase que unicamente estudado por Dardenne (2000). Por outro lado, os depósitos da Formação Rocinha são mais amplamente abordados na literatura, onde sua primeira caracterização foi feita por Dardenne *et al.*, (1986) e ao longo dos últimos anos, diversos autores como Rocha Araújo *et al.*, (1992), Nogueira (1993), Dardenne *et al.* (1997), Oliveira (2011), Sanches (2012), Marques *et al.* (2015) e Sanches *et al.* (2016) tiveram trabalhos publicados sobre este depósito.

Na outra vertente, encontram-se os depósitos do Grupo Bambuí, encaixados nas rochas das Formações Sete Lagoas e Serra da Saudade. Na década de 70, as ocorrências da Formação Sete Lagoas foram relatadas pela empresa METAGO S.A. (Metais de Goiás) e elevadas à condição de depósito, porém não despertaram interesse devido ao pequeno volume (Monteiro, 2009). Com a valorização do minério fosfático, alguns pesquisadores nas décadas seguintes foram atraídos e realizaram uma série de trabalhos clássicos sobre o depósito como Dardenne *et al.* (1986) e Monteiro (2009). Por fim, o depósito da Formação Serra da Saudade, inicialmente descrito por Chaves *et al.* (1971) e melhor detalhado por Dardenne *et al.* (1986) e Lima (2007).

A partir do breve histórico sobre a literatura dos depósitos fosfáticos da Faixa de Dobramentos Brasília, nota-se que as ocorrências relativas à Formação Retiro, base do Grupo Vazante, foram as menos abordadas em estudos técnicos e acadêmicos, o que gera uma maior necessidade de obtenção de dados e da realização de trabalhos que enquadrem geologicamente essas ocorrências. Além da falta de informação geológica sobre os siltitos fosfatados e fosforitos da Formação Retiro, outro problema levantado pelo presente trabalho, que será devidamente apresentado e discutido nos capítulos subsequentes, é a cartografia do Grupo Vazante na porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília, sendo que Signorelli *et al.* (2013) enquadram as unidades estratigráficas expostas na área de estudo como pertencentes ao Grupo Bambuí.

1.2 JUSTIFICATIVA

O modelo de fosfogênese pré-cambriana que vem sendo amplamente discutido durante a última década por Papineau (2010) e Nelson *et al.* (2010), dentre outros, aplica-se plenamente aos depósitos da Formação Rocinha, onde a fonte de P_2O_5 , assim como do Fe seriam as áreas continentais expostas ao intemperismo após eventos de glaciação, no qual o PO_4^{2-} é levado para o mar juntamente com o Fe, formando complexos de oxi-hidróxidos de Fe com PO_4 . Em mares estratificados, como ocorria potencialmente no Proterozoico, ao atingirem a transição entre as zonas subóxica e anóxica devido ao movimento gerado por correntes marinhas ascendentes, esses complexos seriam reduzidos pela ação de microrganismos, liberando P que se liga com F e CO_2 da água do mar para formar o carbonato-fluorapatita, o qual se precipita nos sedimentos marinhos (Nelson *et al.*, 2010).

Assim como o depósito da parte mediana do Grupo Vazante, os depósitos do Grupo Bambuí possuem uma metalogênese bem definida. Segundo Monteiro (2009), a deposição das rochas fosfatadas da Formação Sete Lagoas ocorreu em um ambiente marinho epicontinental, no contexto geológico de uma provável bacia do tipo *foreland* com eventos de inundação continental causados por transgressões marinhas pós-glaciais. A ausência de níveis carbonosos e a natureza detrítica dos sedimentos sugere que a fosfogênese ocorreu sem a participação de

microrganismos, além da presença de cristais euédricos de pirita, mostrando um ambiente mais redutor e com elevada razão de Ca/Mg, sendo que parte do Mg existente na água do mar no momento de deposição fosfática foi consumido pela dolomitização de calcários. Por fim, a precipitação fosfática está intimamente condicionada a paleocanais irregulares e descontínuos encaixados no embasamento granítico da suíte Aurumina ou sobre arcóseos do Grupo Araí, mostrando a importância do controle paleogeográfico na gênese do depósito.

No caso da Formação Serra da Saudade, parte superior do Grupo Bambuí, a acumulação de sedimentos fosfáticos ocorre em duas etapas distintas: uma primeira de idade neoproterozoica, onde Lima *et al.* (2007) sugerem a precipitação direta de francolita em ambientes mais oxidantes de águas rasas e baixa energia com pouca participação carbonática. Essas ocorrências primárias seriam retrabalhadas por ondas de tempestades e reconcentradas por eventos supergênicos. A segunda etapa, de idade cretácea, seria a percolação de fraturas e preenchimento de porosidades por fluídos ricos em PO₄ oriundos do intemperismo da Formação Mata da Corda, sobreposta a Formação Serra da Saudade (Dardenne *et al.*, 1986).

No entanto, os fosforitos de Coromandel - MG se encontram em contato direto com diamictitos, os quais por vezes são fosfatados, indicando uma fosfogênese provavelmente contemporânea à imediatamente após um evento de glaciação, gerando dúvidas sobre sua gênese. Como não existem trabalhos acadêmicos referentes a essa ocorrência de fosfato específica, esse projeto se justifica ao preencher essa lacuna.

1.3 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo localiza-se no município de Coromandel, estado de Minas Gerais, situado na mesorregião do Triângulo Mineiro - Alto Paranaíba, a 430 km de Brasília, mais precisamente entre as coordenadas métricas UTM 284.653N a 295.011N e 7.963.329E a 7.984.435E (Datum Horizontal WGS 84, Zona 23S). Tendo a cidade de Brasília-DF como ponto de partida, as principais vias de acesso são a BR-040 até a cidade de Paracatu-MG, onde se deve seguir caminho pela MG-188 (Rodovia Alírio Herval) até a cidade de Coromandel-MG, na qual o ingresso à área é finalmente realizado pela BR-352 (Rodovia Gustavo Capanema) e suas vicinais como mostra a Figura 1.1.

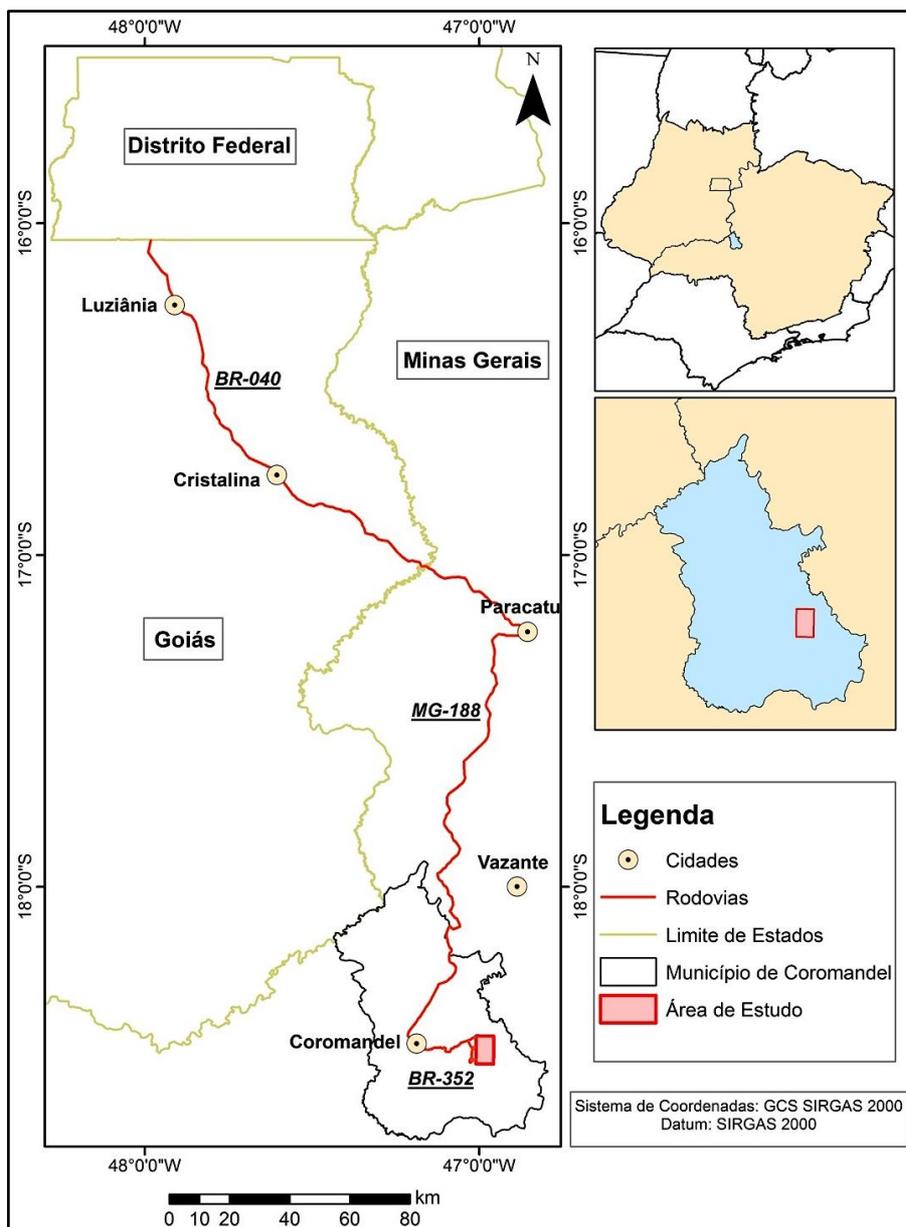


Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo e suas principais vias de acesso partindo da cidade de Brasília-DF.

1.4 OBJETIVOS

O projeto tem por objetivo propor um modelo fosfogenético para os fosforitos de Coromandel - MG juntamente com possíveis interpretações paleoambientais e a sua correlação com os demais depósitos de fosfato das bacias neoproterozoicas do Brasil Central, além do detalhamento da geologia da região com a elaboração de um mapa geológico na escala 1:50.000.

Se corretas as correlações propostas e os processos fosfogenéticos envolvidos, novas perspectivas certamente se abrirão para exploração mineral nessas bacias. Como objetivo secundário pretende-se contribuir com a controvérsia sobre a região do extremo sul da Faixa Vazante, em que as ocorrências de fosforitos e siltitos fosfatados se encontram.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto aplicou procedimentos de campo consagrados na área da geologia, onde a metodologia foi dividida nas etapas pré-campo, campo, e pós-campo.

Na fase pré-campo foram realizados levantamentos bibliográficos, principalmente sobre as ocorrências de fosfato sedimentar e modelos fosfogenéticos em bacias proterozoicas, além de trabalhos clássicos focados na caracterização e descrição dos principais litotipos relativos ao Grupo Vazante. Essa etapa também contou com o processamento de imagens dos sensores *Landsat 8* e *Alos Palsar*, por meio dos *softwares ArcGis 10.2* e *ENVI 5.4*. As imagens encontram-se disponíveis gratuitamente no site da *USGS* e *Alaska Satellite Facility* (ASF Alaska), respectivamente, e deram suporte ao campo assim como na determinação de contatos durante a confecção do mapa geológico. Também foram processadas imagens geofísicas de gamaespectrometria geradas a partir do levantamento ocorrido em Minas Gerais no ano de 2001, que foi executado pela empresa *LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÃO S.A* e disponibilizado pela *Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais* (CODEMIG).

A fase de campo foi subdividida em três campanhas que resultaram em um total de 111 pontos descritos e 29 amostras coletadas, como mostra o mapa de pontos do Apêndice 1. A primeira campanha ocorreu entre os dias 18/02/2017 a 21/02/2017, onde foram visitados 36 afloramentos e coletadas 16 amostras. Uma segunda que ocorreu entre os dias 06/12/2017 e 10/12/2017 em que foram descritos 54 afloramentos e realizadas 9 amostragens. Por fim, a terceira campanha, na qual foram realizadas mais 5 amostragens e descritos 11 pontos, além da confirmação e refinamento dos contatos do mapa geológico, entre os dias 24/05/2018 e 28/05/2018. As amostras coletadas foram escolhidas de forma a representarem as principais litologias aflorantes e suas respectivas características. No caso da Unidade Fosfatada, as amostras coletadas apresentaram reação ao molibdato de amônia em campo, tento em vista que o fosfato reage com essa substância em meios acidificados formando um produto de coloração amarelada, cuja intensidade da cor está diretamente ligada a concentração de PO_4 , o que identifica previamente as zonas de maior teor. Por fim, foram realizadas seções de detalhe entre o diamictito e as áreas fosfatadas para definir sua correlação e marcar a função do diamictito como vetor exploratório.

Na etapa pós-campo foram confeccionadas lâminas petrográficas (amostras LTC - 09A, 11B, 23, 25A, B e C, 26, 97), que auxiliaram na descrição mineralógica e textural dessas rochas, juntamente com análises de Difração de Raios-X (DRX) (amostras LTC - 09B, 11B, 11C, 26, 30, 46, 53, 89A, 90A, B e C) que identificaram os principais minerais presentes nas rochas fosfatadas a partir de suas estruturas cristalinas, além de análises químicas de óxidos maiores por Fluorescência de Raios-X (FRX) (amostras LTC - 09B, 11B, 11C, 26, 30, 46, 53, 89A, 90A, B e

C) que mostraram valores anômalos de P_2O_5 em algumas das amostras.

A principal aplicação da Difração de Raios-X refere-se à identificação de compostos cristalinos, onde os planos de difração e suas respectivas distâncias interplanares são características específicas e únicas de cada substância, da mesma forma que o padrão difratométrico por ela gerado.

Para a geração dos difratogramas de fração argila e rocha total, aplicou-se a rotina de análises do Laboratório de Raios-X da Universidade de Brasília que conta com um difratômetro Rigaku - Ultima IV. Para a fração argila, as 11 amostras selecionadas foram pulverizadas manualmente em panela de ágata e separados cerca de 7 gramas por amostra, que foram diluídas em 150 mL de água destilada e centrifugadas a 750 RPM por 7 minutos. Após essa primeira fase, o sobrenadante foi reservado em um tubo limpo e novamente centrifugado a 3000 RPM por 30 minutos, resultando na decantação de todo material argiloso, utilizado para a confecção das laminais de fração argila, glicolada e aquecida. No caso da análise de rocha total, a amostra pulverizada foi diretamente inserida no sulco da lâmina específica para tal procedimento.

A Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) permitiu realizar análises químicas quantitativas, as quais puderam determinar os teores de P_2O_5 das amostras, sendo essa a técnica analítica preferida para se analisar elementos principais, onde são toleradas incertezas na faixa entre 0,2 a 4%, o que a torna capaz de determinar uma larga faixa de elementos até limites de detecção da ordem de ppm que, em alguns casos, não pode ser feito por outras técnicas analíticas com a mesma relação custo/benefício.

Nessa etapa, as 11 amostras escolhidas foram pulverizadas e a rotina de análise foi realizada pelo Laboratório de Estudos Geodinâmicos da Universidade de Brasília. A preparação das pérolas de FRX consistiu na pesagem de 0,9 gramas de amostra, 6 gramas de tetraborato de lítio e 3 gramas de metaborato de lítio, que foram homogeneizados em cadinho de platina e adicionadas de 2 gotas de solução de brometo de lítio (50% m/v) e fundidas até o ponto de vitrificação. Após esse procedimento inicial, as amostras foram inseridas no Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X, modelo Rigaku - ZSX Primus II, e os valores medidos recalculados para porcentagem em óxidos.

A etapa final da pesquisa, que compreende o último ano de projeto, principalmente nas fases de redação dos capítulos, todos os dados foram integrados e comparados com as dos outros depósitos já conhecidos da Faixa Vazante e do Grupo Bambuí. O modelo metalogenético foi proposto a partir das determinações mineralógicas, correlações estratigráficas, posicionamento na estratigrafia regional e paleogeografia do ambiente deposicional.

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 INTRODUÇÃO

Na área de estudo ocorrem rochas metassedimentares de baixo grau metamórfico cujo posicionamento cronoestratigráfico ainda é controverso, pelo menos em parte das sucessões de rochas que apresentam contatos tectônicos entre si.

Três conjuntos de rochas com ampla distribuição na Faixa Brasília estão potencialmente presentes na área de estudo, incluindo os Grupos Canastra, Vazante e Bambuí. O Grupo Canastra por apresentar grau metamórfico na zona da clorita e por conter rochas características como filitos carbonosos é considerado como presente na região por diferentes autores. Os Grupos Vazante e Bambuí por conterem rochas metassedimentares majoritariamente pelíticas que, muitas vezes se confundem, são considerados por diversos autores ora presentes, ora ausentes na área de estudo. Desta forma no item referente ao contexto geológico regional será apresentada a estratigrafia destes três conjuntos litoestratigráficos.

2.2 GRUPO CANASTRA

O Grupo Canastra, definido inicialmente como Formação Vazante (Barbosa, 1955) foi elevado a condição de grupo pelo mesmo autor no início da década de 70 (Barbosa, 1970). A maior parte da sua distribuição ocorre na região oeste do estado de Minas Gerais, porém as rochas características do grupo ainda afloram em porções restritas dos estados de Goiás e Distrito Federal.

É constituído por um espesso pacote de rochas metassedimentares pelíticas a psamíticas com associações de níveis carbonáticos, depositadas em um megaciclo regressivo (Dardenne, 2000). Em termos metamórficos, essas rochas apresentam graus de metamorfismo que variam de fácies xisto verde chegando a porções pontuais em fácies anfíbolito, como observado na região de Tapira (Silva, 2003).

Freitas Silva & Dardenne (1994) inicialmente dividiram a estratigrafia do Grupo Canastra nas Formações Serra do Landim, Paracatu e Chapada dos Pilões, sendo que a Formação Paracatu ainda foi subdividida nos Membros Morro do Ouro e Serra da Anta e a Formação Chapada dos Pilões nos Membros Serra da Urucânia e Hidrelétrica do Batalha.

Após esse primeiro trabalho, Dardenne (2000) adota a divisão do grupo em quatro formações distintas: Serra do Landim, Paracatu, Serra da Urucânia e Serra da Batalha, como pode ser observado na coluna estratigráfica da Figura 2.1.

A Formação Serra do Landim é caracterizada pela presença de margas e lentes calcárias que gradam a calci-filitos e calci-xistos com raras intercalações quartzíticas.

A Formação Paracatu ocorre imediatamente sobreposta à Formação Serra do Landim e é subdividida em dois membros. O membro de posição mais basal, denominado Morro do Ouro devido aos seus teores do metal, é basicamente composto por filitos carbonosos escuros com intercalações de quartzitos finos. Logo acima do membro basal, ocorre o contato com o Membro Serra da Anta, caracterizado pela presença de sericita filitos intercalados com filitos carbonosos além de quartzitos finos.

A Formação Serra da Urucânia é composta por um pacote de metarritmitos arenosos com intercalações de quartzitos finos, interpretados como depositados em ambientes marinhos profundos a pouco profundos, com associação de fácies turbidíticas que passam para plataforma dominada por tempestades em direção ao topo. Desta forma, no conjunto de metassedimentos predominam os metapelitos (filitos).

Por fim, no topo do Grupo Canastra ocorre a Formação Serra da Batalha com ampla predominância de quartzitos finos micáceos. Como as estruturas sedimentares tipo cruzadas acanaladas, espinha de peixe e tangenciais de baixo ângulo ocorrem com certa frequência, este conjunto é interpretado como depositado em plataforma dominada por marés.

Dados apresentados por Rodrigues (2008) indicam idade máxima de deposição de cerca de 1.05 Ga, interpretação baseada na presença de zircões detriticos desta idade. Portanto, este grupo é atualmente interpretado como de idade mesoproterozoica sendo cronocorrelato ao Grupo Paranoá que ocorre na porção mais externa da Faixa Brasília.

Na área de estudo, a ocorrência do Grupo Canastra está restrita às bordas leste e oeste da área, sendo que apenas afloram sericita filitos do Membro Serra da Anta e os quartzitos finos micáceos da Formação Serra da Batalha.

2.3 GRUPO VAZANTE

A sequência de rochas denominadas de Formação Vazante (Dardenne, 1978) foi elevada à condição de grupo por Dardenne *et al.* (1998). O Grupo Vazante, que possui grande parte da sua ocorrência no estado de Minas Gerais, é uma sucessão pelito-carbonática depositada em uma plataforma marinha rasa durante um ciclo regressivo (Dardenne, 1981) no contexto geológico de uma bacia de margem passiva (Fuck *et al.*, 1994 e Pimentel *et al.*, 2001), que apresenta grande interesse econômico devido a variedade de depósitos minerais (zinco, chumbo, fosfato, argilas e rochas carbonáticas) presentes em seus domínios.



Figura 2.1 - Coluna estratigráfica do Grupo Canastra compilada de Dardenne (2000).

A partir da coluna estratigráfica proposta por Dardenne (2000) representada na Figura 2.2, observa-se que o Grupo Vazante é uma sucessão com sistemas deposicionais iniciados por um ambiente marinho sublitorâneo influenciado por evento glaciogênico, passando para um ambiente perilitorâneo carbonatado com cordões recifais litorâneos e finaliza com depósitos de planície de maré. O Grupo Vazante apresenta grau metamórfico baixo e foi subdividido por Dardenne (2000) em sete unidades formalizadas como formações: Retiro, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Serra da Lapa.

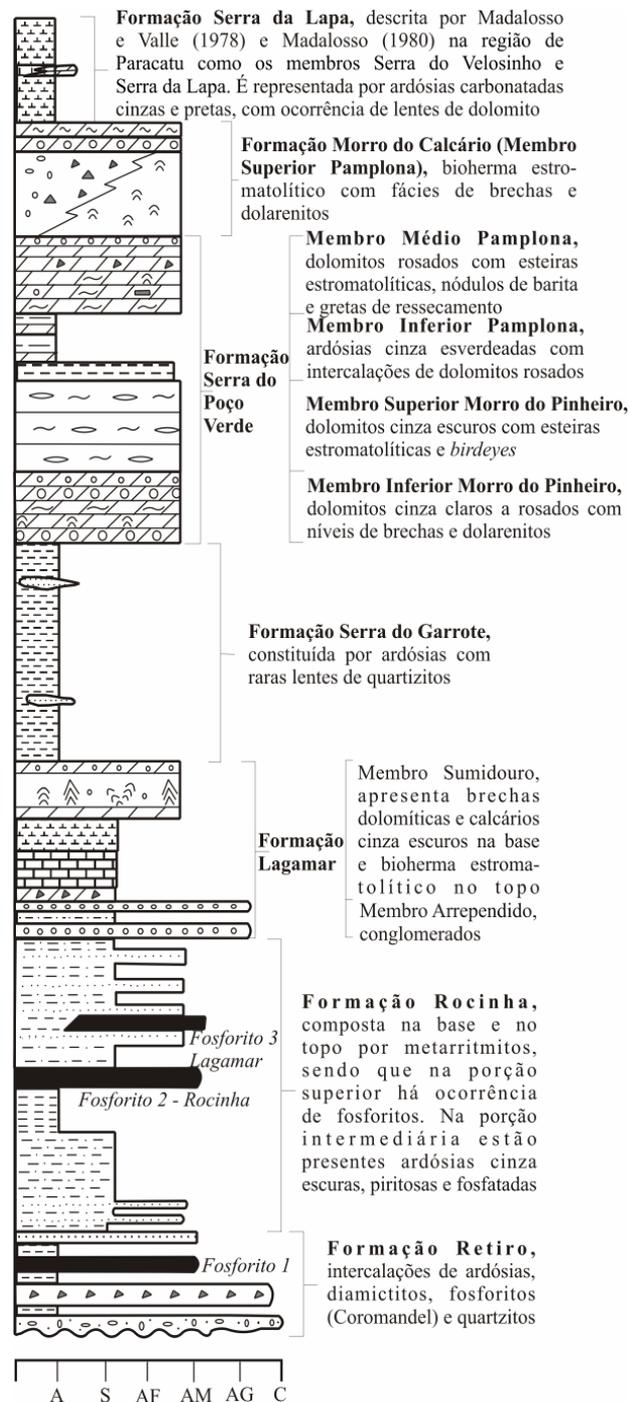


Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Grupo Vazante, compilada de Dardenne (2000).

A Formação Retiro é definida a partir de uma associação de níveis métricos de quartzitos esbranquiçados com intercalações de delgados níveis pelíticos e diamictitos polimíticos matriz-suportados que gradam a porções de arenitos conglomeráticos também polimíticos. Os seixos desses diamictitos/arenitos conglomeráticos são de composições variadas que compreendem metapelitos, quartzitos facetados com estruturas do tipo “*iron flat*” e estrias de arrasto, granitos, tonalitos, dolomitos e calcários. Em contato direto, imediatamente acima desses diamictitos, que localmente possuem a matriz fosfatizada, encontram-se os siltitos fosfatados e fosforitos de Coromandel, identificados por Dardenne (2000) como Fosforito 1.

Logo acima da Formação Retiro ocorre a Formação Rocinha, que compreende uma sequência rítmica marcada pela alternância de níveis pelíticos e arenosos que passam a um espesso pacote de siltitos e pelitos com intercalações monótonas sobrepostos por ardósias escuras e piritosas com a presença de finas laminações fosfáticas que se alternam entre fosfarenitos e fosfolutitos calcíferos (Nogueira, 1993). Esse nível fosfático é denominado Fosforito 2 por Dardenne (2000) e nele se aloja o depósito de classe mundial de Rocinha (Souza 1997 e Dardenne, 1998). Finalmente, na porção superior da Formação Rocinha, ocorrem ritmitos arenosos com níveis de fosfarenitos responsáveis pelo depósito de Lagamar (Nogueira, 1993), denominado Fosforito 3.

A Formação Lagamar é subdividida em dois membros distintos: Arrependido e Sumidouro, sendo que no último é registrada a primeira aparição carbonática do grupo. O Membro Arrependido é basicamente composto por um conglomerado basal seguido da alternância de quartzitos, metassiltitos e ardósias. Por outro lado, no Membro Lagamar estão presentes brechas estromatolíticas, sucedidas por horizontes de calcários escuros estratificados intercalados por brechas lamelares e dolomitos no topo. Esses dolomitos configuram-se na forma de biohermas estromatolíticas, nos quais ocorre a associação de dolomitos com esteiras microbiais, dolarenitos, doloruditos e estromatólitos colunares do tipo *Conophyton metula* (Moeri, 1972; Cloud & Dardenne, 1973).

A Formação Serra do Garrote (Madalosso & Vale, 1978; Madalosso, 1980; Dardenne, 1978; Campos Neto, 1984; Dardenne *et al.*, 1997, 1998), representa a sequência marinha de maior profundidade do grupo, onde afloram basicamente ardósias de coloração que varia entre cinza e verde escuro, piritosas e carbonosas com raras intercalações quartzíticas.

Em contato com a Formação Serra do Garrote está a Formação Serra do Poço Verde que consiste em uma sequência predominantemente dolomítica subdividida em quatro membros: Morro do Pinheiro Inferior, Morro do Pinheiro Superior, Pamplona Inferior e Pamplona Médio. O Membro Morro do Pinheiro Inferior é constituído por dolomitos cinza a rosados, maciços e raros dolarenitos com intercalações de folhelhos carbonosos e piritosos. O Membro Morro do Pinheiro Superior apresenta dolomitos escuros com estruturas do tipo “*Birds eyes*” e esteiras microbiais, com quantidades subordinadas de dolarenitos e folhelhos carbonosos piritosos. O Membro Pamplona Inferior, por sua vez, caracteriza-se pela ocorrência de folhelhos carbonáticos, ardósias carbonosas e finos níveis dolomíticos. Por fim, o Membro Pamplona Médio, que compreende dolomitos claros com laminações algais subordinadas, níveis dolareníticos, estromatólitos colunares e raras lentes de folhelho escuro.

A Formação Morro do Calcário, hospedeira dos depósitos de zinco e chumbo do tipo “*Mississippi Valey Type*” (MVT) foi subdividida apenas no Membro Pamplona Superior, formado majoritariamente por dolomitos, biostromos e biohermas com laminações convexas, doloruditos, dolarenitos oolíticos e oncólitos.

Por fim, a unidade estratigráfica de topo do Grupo Vazante é a Formação Serra da Lapa, onde aflora uma sequência de filitos carbonosos e metassiltitos carbonáticos intercalados por lentes dolomíticas, também mineralizadas em chumbo e zinco, com estromatólitos e esteiras algais, além de finos níveis quartzíticos.

Com base na grande espessura da sucessão estratigráfica do Grupo Vazante (>2500m), enfatizando as espessas camadas compostas por calcários dolomíticos, Dardenne (1981) e Marini *et al.* (1981) também sugerem que a deposição deste grupo pode estar condicionada à uma bacia de grande subsidência. Dardenne (2000) ainda sugere que a bacia responsável pela acomodação dos sedimentos do Grupo Vazante seja do tipo *foreland*, formada nos estágios iniciais dos *fronts* de cavalgamento da Faixa de Dobramentos Brasília (Sanchez *et al.*, 2012).

2.4 GRUPO BAMBUÍ

O Grupo Bambuí é uma sucessão pelito-carbonatada com arcóseos no topo que ocorre nas porções externas meridional e setentrional da Faixa Brasília e inclusive sobre o Cráton São Francisco. Na Faixa Brasília, as unidades de tal grupo que contém carbonatos são predominantemente pelíticas e as rochas carbonáticas ocorrem na forma de lentes de diferentes dimensões. Sobre o cráton, os carbonatos ocorrem como sucessões contínuas e espessas de forma que as camadas individuais podem ser seguidas por centenas de quilômetros.

Da base para o topo são reconhecidas cinco unidades, formalizadas como formações: Jequitaiá, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias (Dardenne, 1978) (Figura 2.3).

A Formação Jequitaiá é composta por diamictitos glaciogênicos com ocorrência restrita lateralmente e com espessura inferior a 40 metros. Na matriz argilo-silto-arenosa fina flutuam clastos de quartzito, arcóseos, granitos, carbonatos, dentre outros, que apresentam formatos angulosos e tamanhos variáveis. A natureza dos sedimentos desta unidade permite afirmar que se trata de um evento de glaciação continental a partir da expansão de capas de gelo que alcançavam as zonas distais dos centros glaciais (Martins-Ferreira *et al.*, 2013).

A Formação Sete Lagoas é definida na Faixa Brasília por margas e folhelhos interdigitados com lentes de dolomitos e calcários. As fácies carbonáticas não são predominantes, entretanto, sempre são reconhecidas nas áreas indubitavelmente relacionadas a esta unidade.

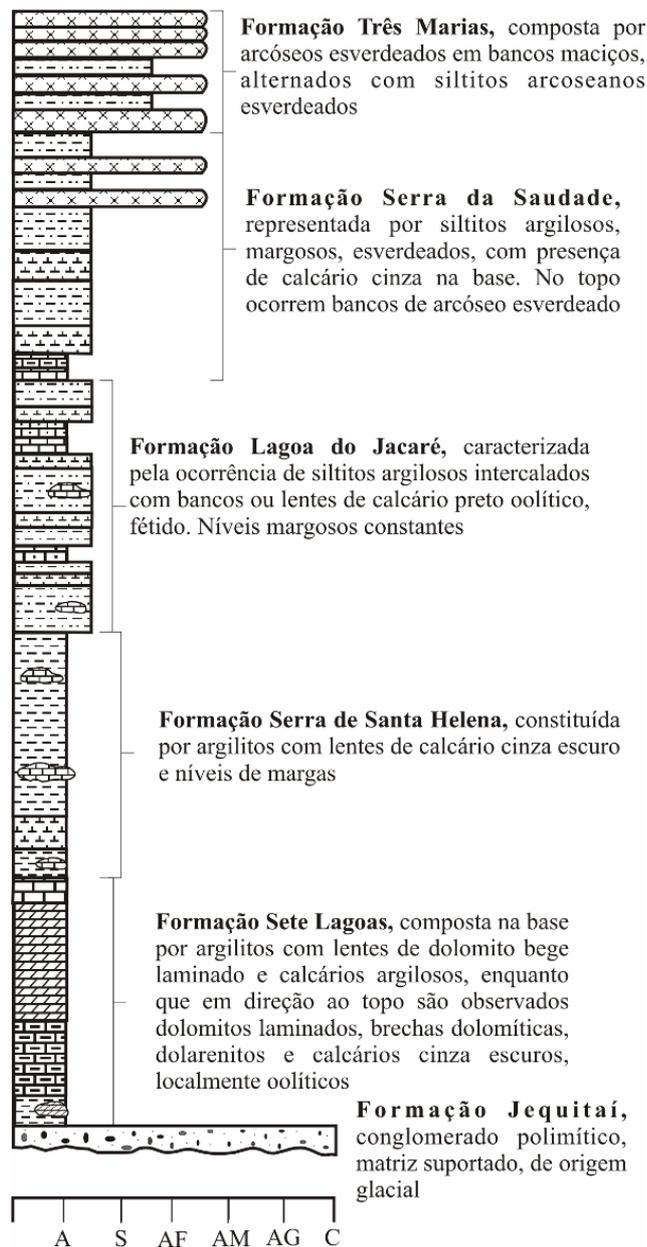


Figura 2.3 - Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí definida por Dardenne (1978).

A Formação Serra de Santa Helena é composta por siltitos ricos em muscovita detrítica orientada nos planos de acamamento. Raramente ocorrem arenitos e grauvacas finas a muito finas que se destacam nos planos de acamamento. É uma unidade essencialmente terrígena e por isso os solos que se desenvolvem sobre as rochas desta unidade são delgados a pouco desenvolvidos.

A Formação Lagoa do Jacaré é representada por siltitos e margas intercaladas a lentes de calcários oolíticos e oncolíticos ricos em matéria orgânica depositados em plataforma de águas rasas sob ação de ondas.

A Formação Serra da Saudade é essencialmente pelítica, composta por folhelhos e siltitos laminados de cor verde (ricos em illita) e praticamente desprovidos de carbonatos e psamitos.

A Formação Três Marias representa o assoreamento final da bacia Bambuí, sendo caracterizada por siltitos laminados intercalados a arcóseos que predominam no topo da unidade.

Um fato marcante na estratigrafia do Grupo Bambuí é a ausência de psamitos nas unidades basais, sendo que as fácies arcoseanas apenas estão presentes na Formação Três Marias. As unidades em que os carbonatos estão presentes (Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré) são desprovidas de lentes ou camadas de rochas arenosas. Aparentemente, o relevo após o evento glacial se encontrava aplainado, com a formação de vales rasos do ponto de vista regional, que não contribuíam para o transporte e deposição de sedimentos psamíticos para o interior da bacia.

A idade do Grupo Bambuí ainda é motivo de controvérsias. Warren *et al.* (2014) descrevem a ocorrência de fósseis guias ediacaranos de *Cloudina* sp. na Formação Sete Lagoas, o que sugere o enquadramento da porção basal do grupo no Ediacarano Superior, no entanto a maioria dos autores converge para uma idade neoproterozoica de no máximo 600 Ma obtida a partir de análises de zircões detríticos (Pimentel *et al.*, 2011).

2.5 CONTROVÉRSIAS ESTRATIGRÁFICAS

Durante os últimos anos, o conhecimento geológico sobre o Grupo Vazante teve um considerável avanço, porém algumas questões geocronológicas e estratigráficas persistem sem um total entendimento. Cloud & Dardenne (1973) descrevem a ocorrência de estromatólitos colunares do tipo *Conophyton* na Formação Lagamar, o que sugere que a deposição do Grupo Vazante ocorreu em um amplo espaço de tempo entre 1.35 Ga e 0.95 Ga, correspondendo a uma idade mesoproterozoica e correlacionando-o com o Grupo Paranoá. “Por outro lado, a presença dos diamictitos glaciais da Formação Retiro, muito semelhantes aos encontrados na Formação Jequitá, sugere uma deposição relacionada às glaciações criogenianas ocorridas durante o Neoproterozoico e possibilitam a correlação do Grupo Vazante com o Grupo Bambuí. Por ser uma sucessão exclusivamente sedimentar, sem a presença de eventos vulcânicos, as idades de datação absoluta do Grupo Vazante estavam restritas a dados de K/Ar e Rb/Sr em sedimentos pelíticos, que registram a idade de metamorfismo das rochas do grupo (600 Ma) e dados de Pb/Pb realizados em cristais de galena da mineralização do depósito de Morro Agudo, que apresentam idades entre 1.2 Ga e 0.65 Ga” (Freitas Silva & Dardenne, 1997).

Após os trabalhos pioneiros, Sanches *et al.* (2012) citam uma série de trabalhos mais recentes nos quais os autores continuam as discussões acerca das controvérsias estratigráficas do Grupo Vazante. Geboy (2006), Rodrigues *et al.* (2008), Azmy *et al.* (2008), Misi *et al.* (2010 a,b) e Misi *et al.* (2011) sugerem que as unidades localizadas na porção superior do Grupo Vazante, sobrepostas à Formação Rocinha apresentam idades mais antigas, podendo assim ser

interpretadas como unidades alóctones. Essas idades foram baseadas em análises de Re/Os em folhelhos ricos em matéria orgânica da Formação Serra do Garrote, que resultaram em valores de 1,53 Ga (Geboy, 2006) e folhelhos localizados entre a base da Formação Lapa e topo da Formação Morro do Calcário, os quais obtiveram idades de 1,13 Ga (Azmy *et al.*, 2008). Contrapondo-se aos dados geocronológicos, os estudos quimioestratigráficos realizados por Azmy *et al.* (2001) mostraram que os dolomitos possuem valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$, sugerindo uma possível correlação com o Grupo Bambuí (Sanchez *et al.*, 2012).

Por fim, em termos cartográficos, o mapeamento da Faixa Vazante foi executado no ano de 2013 pelo *Serviço Geológico do Brasil* (CPRM) com a denominação de Projeto Vazante-Paracatu I. A porção sul do Grupo Vazante, objeto de estudo da presente dissertação, encontra-se inserida em duas folhas de escala 1:100.000: A Folha Lagamar (Signorelli *et al.*, 2013) e a Folha Patos de Minas (Féboli & Ribeiro, 2013). No entanto, o projeto interpreta a Unidade Rudácea aflorante (diamictitos e arenitos conglomeráticos) como a base do Grupo Bambuí, denominando-a de Formação Carrancas, e segue a sua estratigrafia, passando para locais pontuais com a ocorrência subordinada de calcários relativos à Formação Sete Lagoas, enquadrando as ocorrências de fosfatos e siltitos fosfatados como pertencentes a Formação Serra de Santa Helena.

Tal proposta cartográfica está em desacordo com as anteriores (Souza 1994 e Dardenne 2000) que consideraram estas rochas como relativas à Faixa Vazante.

CAPÍTULO 3 - GEOLOGIA DAS FÁCIES TERRÍGENAS DA FORMAÇÃO RETIRO

3.1 ESTRATIGRAFIA DA FORMAÇÃO RETIRO

Na área de estudo, o Grupo Vazante ocorre restrito a uma delgada faixa limitada pelos contatos tectônicos com o Grupo Canastra, na qual afloram rochas da sua unidade mais basal denominada de Formação Retiro. Tal formação distingue-se das outras unidades estratigráficas sobrejacentes principalmente por apresentar características texturais, estruturais e estratigráficas marcantes que sugerem uma deposição em ambiente fortemente influenciado por glaciação e por eventos ocorridos imediatamente após a deglaciação.

A Formação Retiro pode ser subdividida em 3 associações de litofácies distintas. A primeira representa uma sucessão glaciogênica caracterizada pela intercalação de 3 litofácies: diamictitos polimíticos matriz-suportados, arenitos conglomeráticos polimíticos e arenitos arcoseanos finos e esbranquiçados. A segunda associação representa a Unidade Fosfatada, onde ocorrem 4 litofácies compreendidas por fosforitos, siltitos fosfatados, pelitos laminados amarelados e silexitos. Finalmente no topo da formação, a terceira associação, que retrata uma sedimentação marinha pelítica, intercorrem 2 litofácies: pelitos estratificados avermelhados e pelitos laminados variados. Em termos de nomenclatura, tendo em vista a preservação das estruturas sedimentares e o baixo grau metamórfico superimposto às rochas do Grupo Vazante, não foram adotados os termos de classificação metamórfica.

Essas associações de litofácies possuem grande importância para o enquadramento da metalogênese do depósito de Coromandel-MG e por isso serão mais bem detalhadas nos parágrafos seguintes, com exceção da Unidade Fosfatada, que por ser o principal objeto de estudo do trabalho, será devidamente descrita no capítulo subsequente.

Os diamictitos polimíticos matriz-suportados são compostos por litoclastos de pelitos, granitos, tonalitos, dolomitos, calcários e predominantes quartzitos. Esses litoclastos possuem alta angulosidade e tamanho variando de poucos centímetros, como no caso da maior parte dos litoclastos de rocha pelítica (Figura 3.1A) até litoclastos de tamanho métrico, como nos casos de porções onde são observados blocos de granitos imersos em uma matriz pelítica e coloração avermelhada (Figura 3.1B). Em locais pontuais, nota-se a presença de cavidades de clastos fantasmas, possivelmente gerados a partir da dissolução de litoclastos carbonáticos (Figura 3.1C).

De forma errática, em meio a esses diamictitos encontram-se porções de arenitos conglomeráticos que possuem basicamente seixos de mesma composição dos encontrados no

diamictito, mas que por sua vez, ocorrem envoltos por quantidade subordinada de matriz silto-arenosa e grande quantidade de grãos de quartzo com granulometria variando de areia fina a média. Há uma relação intrínseca entre a granulometria da matriz e a quantidade de seixos da unidade de granulometria grossa. Quanto mais silto-arenosa é a matriz, menor é a quantidade de seixos presentes, sendo que grande parte dos observados compreendem litoclastos de rochas pelíticas e quartzitos (Figura 3.1D).

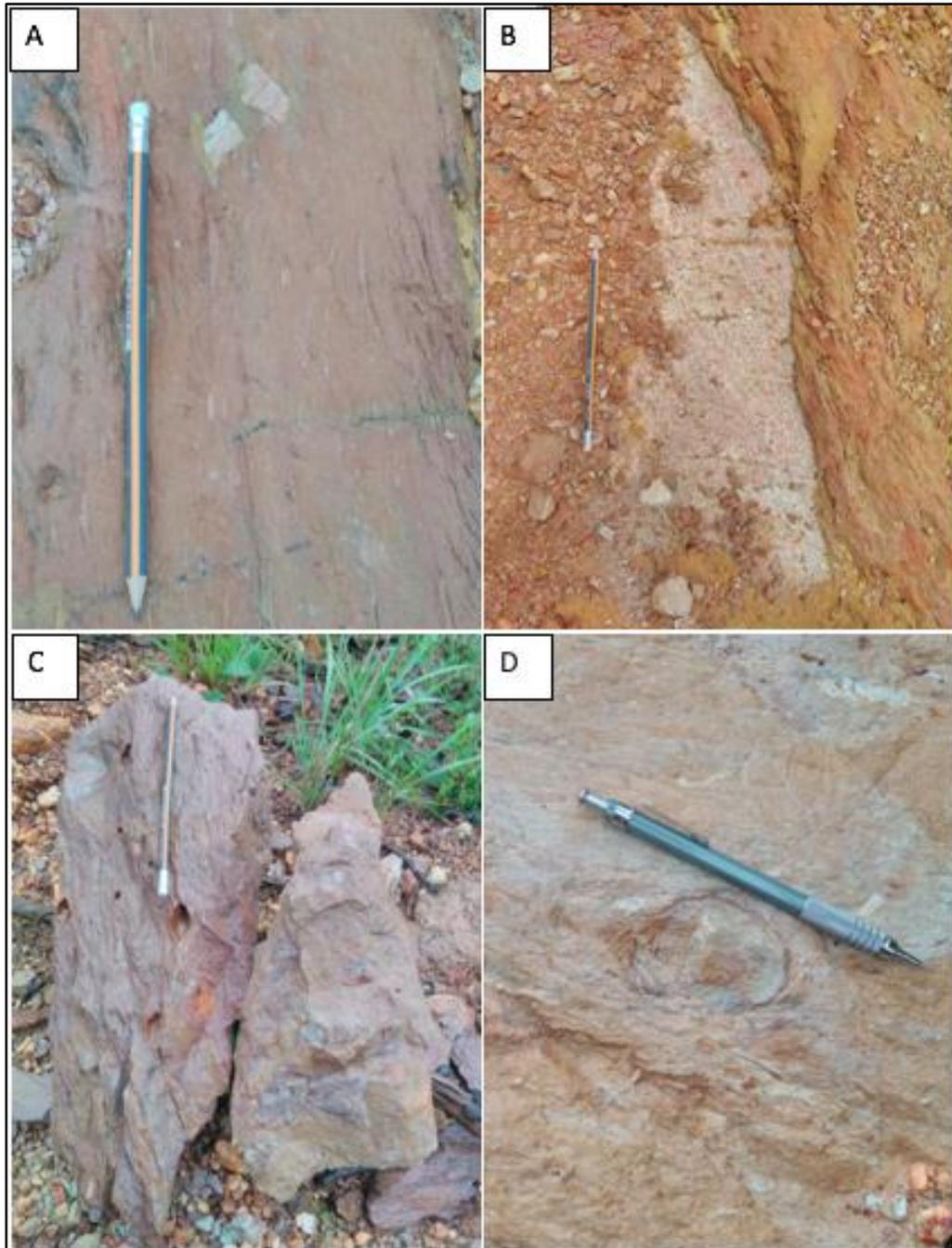


Figura 3.1 - (A) Diamictito com seixos de litoclastos pelíticos com cerca de 1,5 cm de comprimento imersos em meio a matriz de granulometria areia fina. (B) Diamictito com bloco de rocha granítica alterada com cerca de 50 cm de comprimento em meio a matriz pelítica. (C) Diamictito com cavidades de seixos fantasmas geradas por provável dissolução de carbonatos. (D) Arenito conglomerático com seixo isolado de quartzito arredondado com cerca de 4 cm de diâmetro.

Os clastos de quartzitos presentes nessas litologias apresentam-se, predominantemente, de forma angulosa, porém não são raras as ocorrências de fragmentos arredondados e ligeiramente estirados com uma das laterais facetada, na forma de “*iron flats*”, com a presença de estrias de abrasão geradas a partir da movimentação da geleira sobre o pavimento rochoso (Figuras 3.2 A e B).

Nos aspectos estruturais primários, essas litologias apresentam estrutura maciça, contudo em corte de estradas adequados, nota-se a presença de acamamento sedimentar plano paralelo incipiente recortado por uma foliação responsável pela rotação de clastos e formação de sombras de pressão.

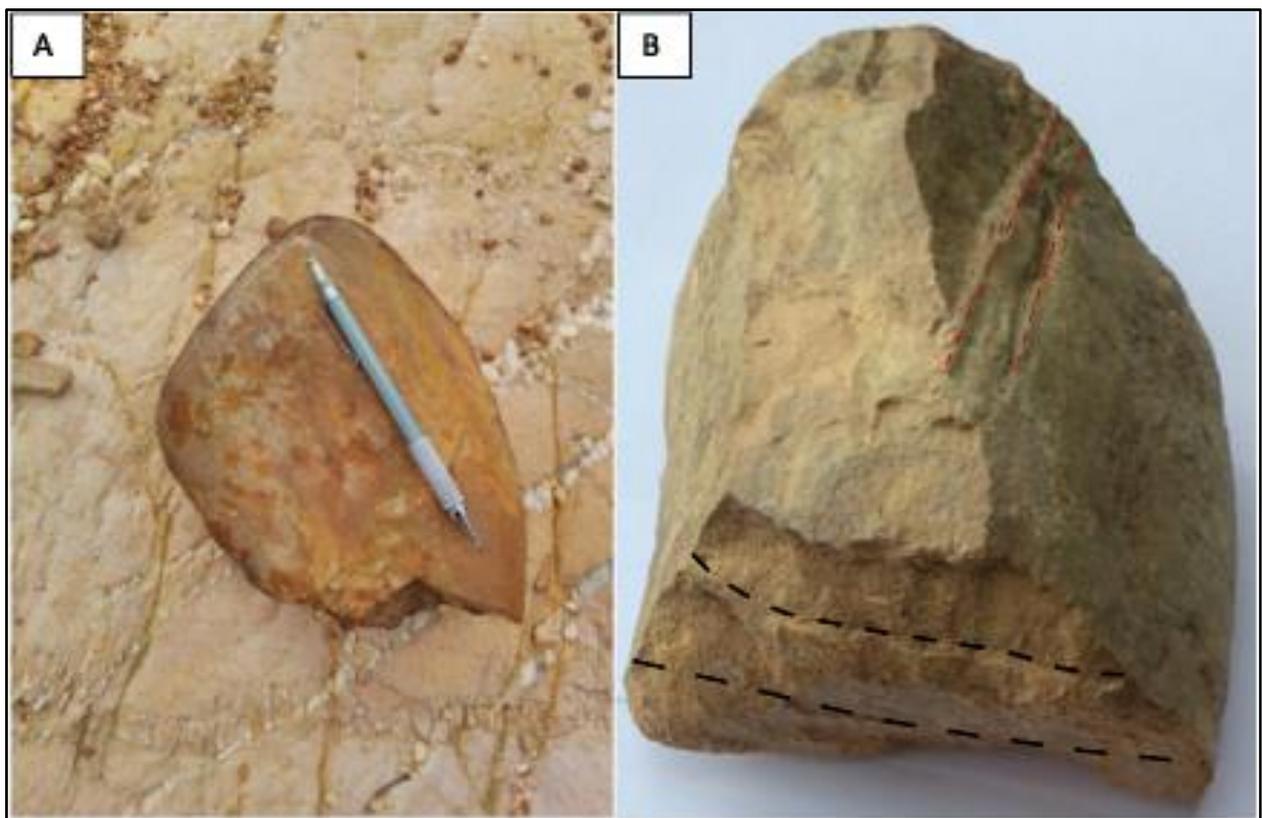


Figura 3.2 - (A) Bloco bem arredondado de quartzito, com comprimento de aproximadamente 20 cm, constituinte do arcabouço do diamictito. (B) Estrias de arrasto (marcadas pelo pontilhado vermelho) na lateral facetada de fragmento de matacão de quartzito do tipo “*iron flats*”. Importante notar que essas linhas destoam dos planos de acamamento (marcados pelo pontilhado preto) e dos planos de fratura, além de truncar de forma oblíqua as linhas de intersecção entre o plano lateral e o acamamento do fragmento.

Petrograficamente, os diamictitos são compostos por aproximadamente 60% de matriz, 35% de arcabouço e 5% de cimento carbonático que ocorre associado a poucos litoclastos. A matriz é basicamente composta por silte/argila com porções onde estão presentes finos minerais micáceos.

Em lâmina delgada, o arcabouço é composto por 60% de grãos de quartzo muito mal selecionados que variam de 0,1 a 0,8 mm. Esses grãos mostram a associação de diferentes

formas, que se alternam entre muito arredondadas e angulosas, característica típica dos depósitos glaciais (Figura 3.3A). Os 40% restantes do arcabouço são representados por 35% de litoclastos e 5% de raros grãos de plagioclásio saussuritizados. Os litoclastos estão disseminados na lâmina de forma aleatória e apresentam formas angulosas e tamanhos que variam de 0,4 mm até 1,5 cm de comprimento. Composicionalmente, podem ser observados 4 tipos litológicos distintos: rocha pelítica, que muitas vezes exerce a função de pseudomatriz (Figura 3.3B), grauvacas, arenitos finos e dolomitos.

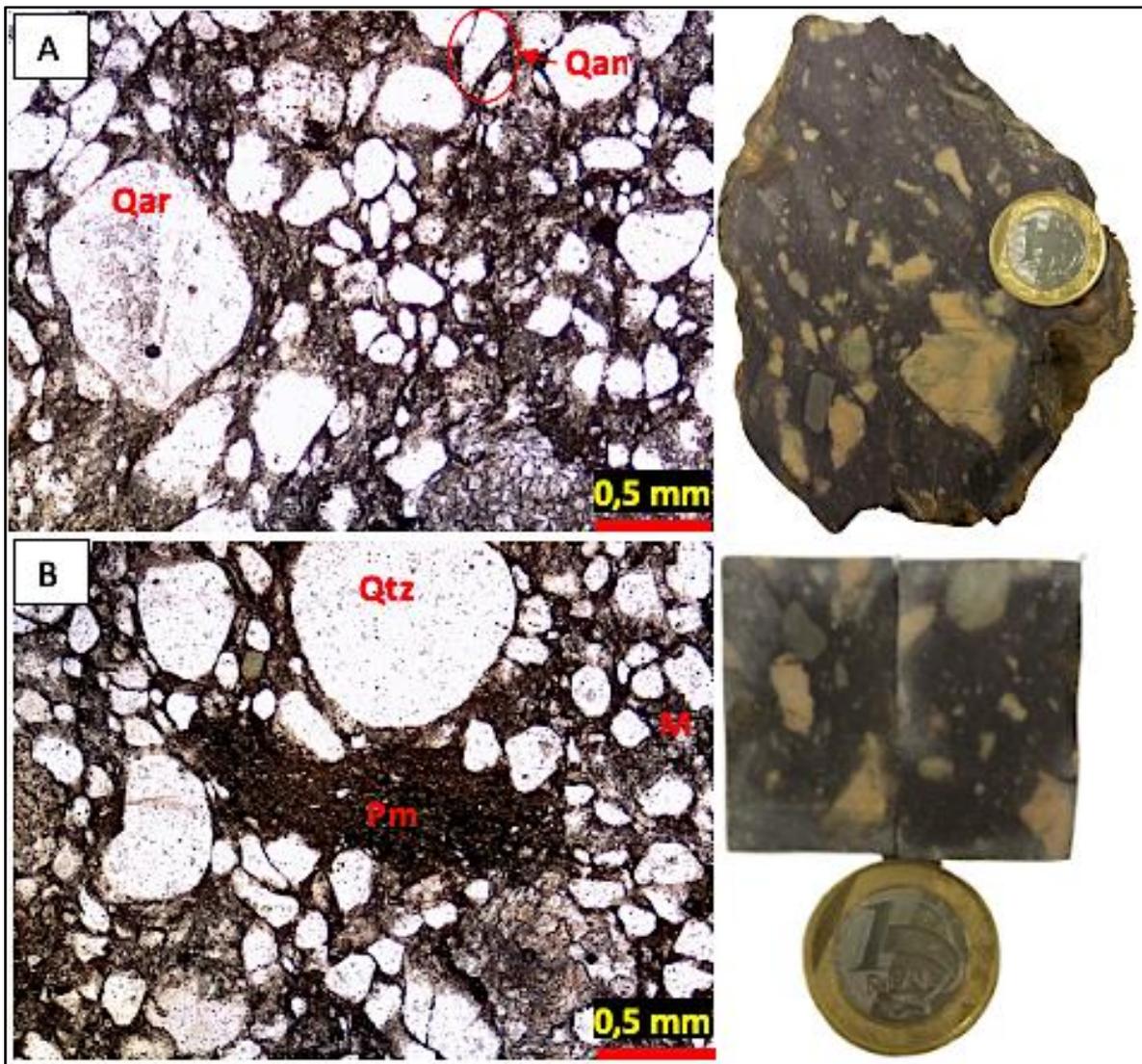


Figura 3.3 - (A) Fotomicrografia de diamictito com arcabouço constituído por grãos de quartzo com diferentes graus de arredondamento e angulosidade (Qan = grão de quartzo anguloso, Qar= grão de quartzo arredondado) (N//, 1,25x). (B) Litoclasto pelítico disposto na forma de pseudomatriz. (Qtz = quartzo, Pm = pseudomatriz, M= matriz) (N//, 1,25x).

Em litoclastos dolomíticos pontuais nota-se a formação de uma borda de recristalização de carbonatos (Figura 3.4), além do preenchimento de veios e porosidade secundária pelo mesmo mineral. Devido a grande presença de matriz, os grãos do arcabouço se tocam em contatos pontuais, além de não ser observada a presença de porosidade primária.

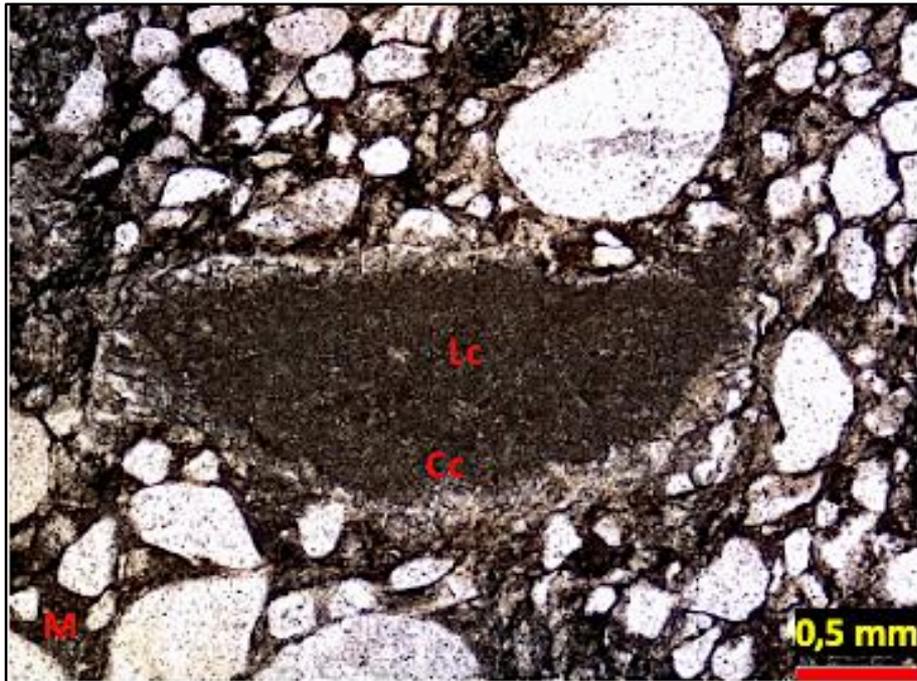


Figura 3.4 - Fotomicrografia de diamictito mostrando litoclastos dolomítico com cerca de 2,5 mm de comprimento cercado por borda de recristalização carbonática. (Qtz = quartzo, Lc = litoclasto, Cc = carbonato, M = matriz) (N//, 1.25x).

Em contraposição aos diamictitos, os arenitos conglomeráticos possuem uma quantidade subordinada de matriz, que perfaz cerca de 10% da lâmina, enquanto o arcabouço representa os outros 90%. A matriz é composta basicamente por grãos de granulometria silte/areia muito fina onde entremeiam grãos de quartzo e menor quantidade de litoclastos.

O arcabouço é formado prevalentemente (70%) por grãos de quartzo pobremente selecionados e com formas de grão contrastantes, assim como o observado nos diamictitos (Figura 3.5A). Esses grãos possuem tamanho que varia de 0,2 mm a 0,5mm, sendo que a granulometria areia fina (0,2mm) predomina por toda a lâmina. Os 30% restantes do arcabouço são compostos por litoclastos monótonos de rochas pelíticas e quartzitos finos (25%) que apresentam tamanho variando de 0,3 a 0,8 mm e 5% de plagioclásio alterado para finos domínios de saussurita.

A extinção dos grãos de quartzo varia desde reta, passando a fracamente ondulante até formar subgrãos, o que demonstra a variedade de materiais que compõem sua área fonte, incluindo desde rochas plutônicas até metamórficas de diferentes graus.

Devido a multimodalidade granulométrica dos grãos de quartzo e presença de litoclastos mais grossos, essas rochas possuem uma textura conglomerática bem marcada (Figura 3.5B), assim como estrutura maciça e arranjo fechado, marcado pela menor quantidade de matriz e contatos planares entre grãos.

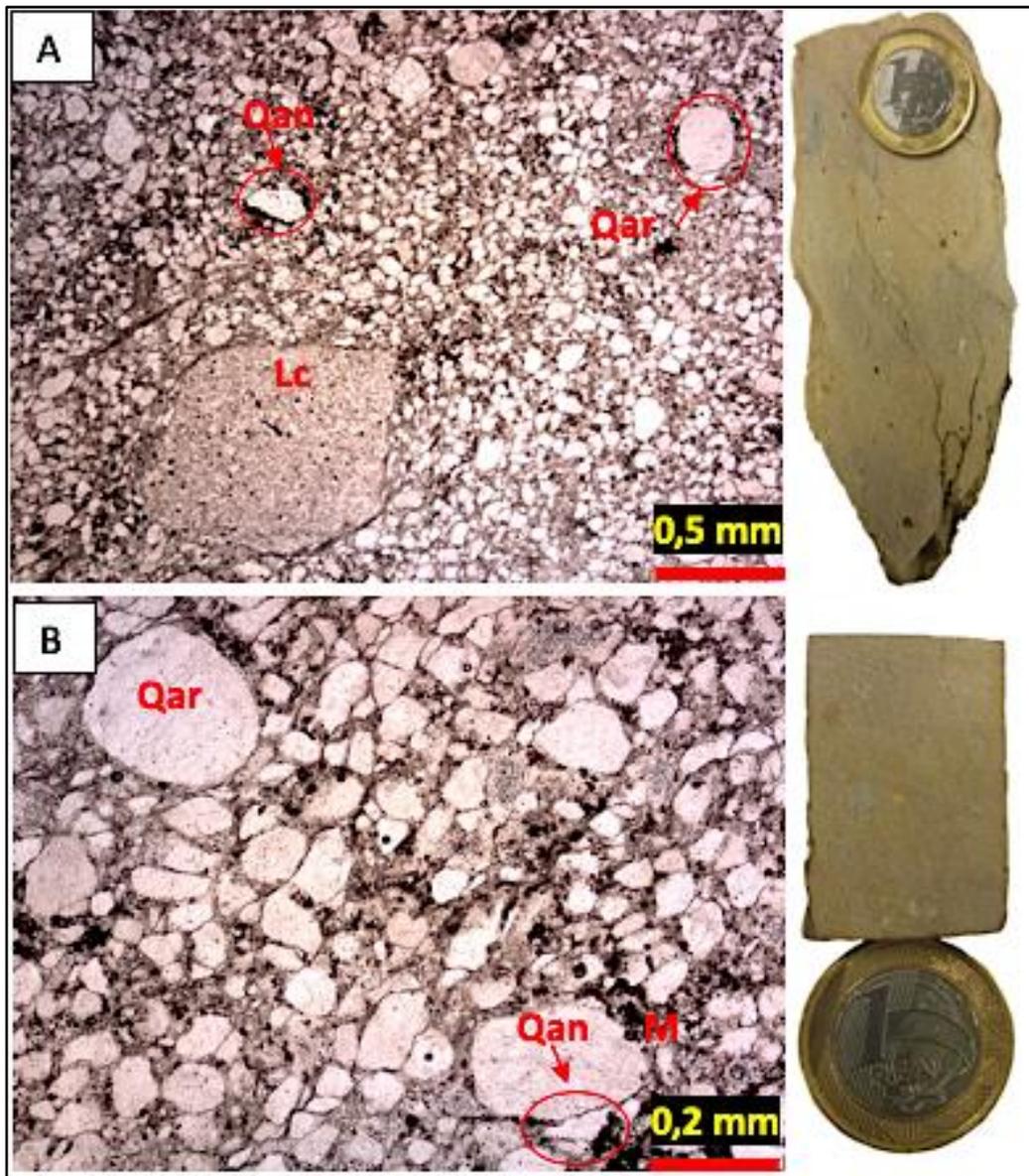


Figura 3.5 - (A) Fotomicrografia de arenito conglomerático evidenciando a predominância dos grãos de quartzo com tamanho entre 0,12mm e 0,2mm. Nota-se que os grãos de quartzo possuem diferentes graus de arredondamento e angulosidade (Qan = grão de quartzo anguloso, Qar = grão de quartzo arredondado, Lc = litoclasto) (N// 1,25x). **(B)** Fotomicrografia da textura dos arenitos onde se observam novamente diferentes granulometrias e forma de grãos. (Qan = grão de quartzo anguloso, Qar= grão de quartzo arredondado, M = Matriz) (N// 4x).

A última litofácies presente na associação basal da Formação Retiro compreende arenitos arcoseanos finos e esbranquiçados. Essas rochas ocorrem como camadas decimétricas entremeadas aos diamictitos e arenitos conglomeráticos, apresentando acamamento bem preservado e dobramentos abertos (Figuras 3.6 A e B). Os afloramentos dos arenitos esbranquiçados ocorrem na área de forma não sistemática e quase sempre seguindo um padrão de lentes, que são mais pronunciadas nas regiões marginais das litofácies conglomeráticas.

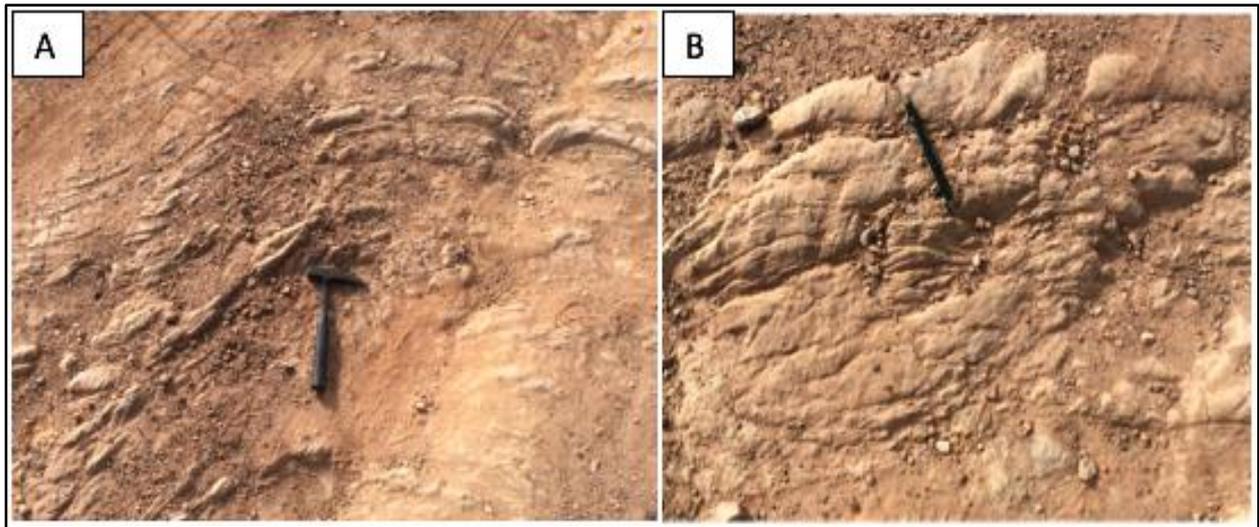


Figura 3.6 - (A) Afloramento rasteiro de arenito arcoseano fino esbranquiçado suavemente dobrado. (B) Detalhe de exposição de arenito arcoseano esbranquiçado mostrando o acamamento sedimentar primário de espessura decimétrica.

Ao microscópio petrográfico, esses arenitos são formados por 90% de grãos do arcabouço e apenas 10% de matriz silto-pelítica, que ocorre associada apenas a locais pontuais da lâmina. Os grãos do arcabouço possuem predominantemente composição de quartzo (85%) e grãos de plagioclásio (15%). Esses grãos são moderadamente selecionados, sub-angulosos e com granulometria areia fina (0,15mm), como mostra a Figura 3.7.

Os arenitos possuem uma estrutura maciça, decorrente da disseminação aleatória dos grãos do arcabouço pela rocha e arranjo fechado, onde os grãos se tocam por meio de contatos pontuais e planares, porém não é incomum a observação de contatos do tipo côncavo-convexo.

Dessa forma, a partir das características petrográficas observadas, nota-se que a transição da base para o topo, da primeira associação de litofácies da Formação Retiro é marcada pela gradativa diminuição da quantidade de matriz e de litoclastos do arcabouço, assim como do aumento modal da fase psamítica.

O desfecho da sedimentação terrígena da Formação Retiro é marcada pelo advento da terceira e última associação de litofácies, onde ocorrem pelitos estratificados avermelhados e pelitos laminados variados. Essas rochas são responsáveis pelo recobrimento de grande parte da área de estudo e estão intrinsecamente relacionados a unidades de relevos colinosos e morrotes com vertentes suavizadas.



Figura 3.7 - (A) Fotomicrografia de arenito fino da Formação Retiro salientando a grande presença de grãos de quartzo no arcabouço. (NX 1,25x) **(B)** Fotomicrografia de arenito fino mostrando a tendência granulométrica (0,15mm), seleção moderado e formato subanguloso dos grãos de quartzo. (NX 4x).

Os pelitos estratificados avermelhados são basicamente compostos por grãos de granulometria argila, e quantidades subordinadas de silte, que foram depositados em ambiente de baixa energia e mais alta taxa de sedimentação, o que propiciou a formação de estratificações do tipo plano paralela de escala centimétrica (Figura 3.8A). Em cortes perpendiculares aos afloramentos, nota-se que as camadas de estratificação apresentam estrutura mais maciça com a presença discreta de laminações, como pode ser observado na Figura 3.8B.



Figura 3.8 - (A) Pelito intemperizado de coloração amarela avermelhada apresentando estratificação plano-paralela, onde as camadas apresentam espessura média aproximada de 4 cm. (B) Detalhe de pelito avermelhado mais preservado de intemperismo, na qual se observa o caráter maciço das camadas plano paralelas.

Ao contrário dos pelitos avermelhados estratificados, os pelitos laminados variados são caracterizados por finas laminações e ampla variação de cores de alteração que retratam diferentes composições químicas. Dentro desse leque de variações, os pelitos laminados arroxeados (Figura 3.9A) são os mais abundantes e formam afloramentos de maior expressão, seguidos pelos outros tipos que apresentam laminações de coloração amarelo pálido e finas intercalações de lâminas escuras. (Figura 3.9B).

Composicionalmente, esses pelitos são formados integralmente por grãos de granulometria argila que foram depositados em ambiente com mais baixas taxas de sedimentação. Em contrapartida aos pelitos avermelhados estratificados, nota-se que essas rochas não possuem nenhuma participação síltica, sendo esse um dos fatores distintivos entre as duas litofácies.

Por fim, a sequência estratigráfica da Formação Retiro, incluindo a unidade de sedimentação química (Unidade Fosfatada), pode ser sintetizada na coluna estratigráfica esquemática da Figura 3.10.

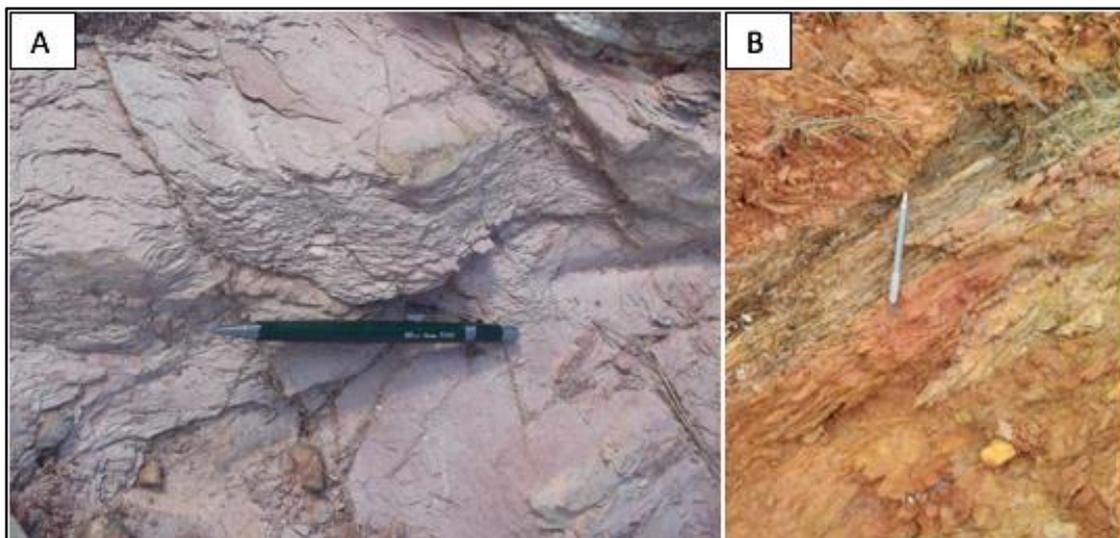


Figura 3.9 - (A) Pelito arroxeadado intensamente laminado predominante na associação de fácies pelito variado. (B) Intercalação entre finas laminações milimétricas de pelito amarelo pálido (rochas alterada) e pelitos mais escuros (rocha mais fresca).

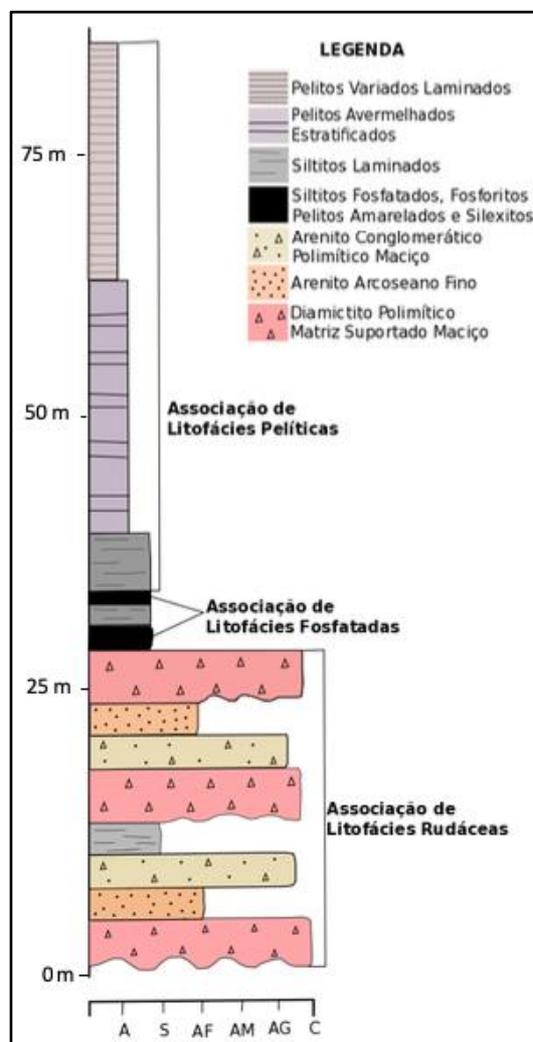


Figura 3.10 - Coluna estratigráfica integrada de um ciclo deposicional da Formação Retiro. É importante salientar que este empilhamento se repete vertical e lateralmente.

A coluna estratigráfica apresentada na Figura 3.10 retrata uma simplificação da estratigrafia da Formação Retiro, tendo em vista que as espessuras das camadas estão representadas de forma aparente com base nos contatos observados em campo e na abundância das ocorrências dos tipos litológicos mapeados na área de estudo. Entretanto, esta seção tipo se repete em diferentes posições dentro da sucessão como um todo, resultando em forte interdigitação de fácies.

A parte inferior da coluna, relativa à associação de litofácies rudáceas está representada de forma a mostrar o caráter episódico das intercalações entre os diamictitos, os arenitos conglomeráticos e arenitos arcoseanos, assim como a posição da Unidade Fosfatada, que pode ser observada em campo, tanto em contato imediato com os diamictitos, quanto entremeada à siltitos laminados, imediatamente acima de um ciclo de deposição de sedimentos rudáceos.

O volume de rochas pelíticas supera amplamente as demais fácies, sendo que as rochas fosfatadas são as mais limitadas em área e volume.

3.2 CONDIÇÕES DEPOSICIONAIS

O Neoproterozoico foi marcado por drásticas mudanças climáticas. Durante essa Era, destaca-se o Período Criogeniano, responsável por ao menos duas grandes glaciações principais. A glaciação de idade Sturtiana (~ 720 Ma) e a glaciação de idade Maroniana (~ 630 Ma), responsáveis pela formação de sequências glaciais distribuídas ao longo de todas as bacias neoproterozoicas mundiais (Babinski *et al.*, 2011). Segundo Kirschvink (1992), essas glaciações estão intrinsecamente relacionadas a aglomeração da maior parte das massas continentais em médias e baixas latitudes, onde o regime climático de baixas temperaturas predominava.

A partir das associações de fácies e baseado no enquadramento geológico do Período Criogeniano, pode-se inferir sobre a série de ambientes deposicionais que influenciaram a sedimentação da Formação Retiro.

A primeira associação de fácies sugere que o início da sedimentação da Formação Retiro ocorreu no contexto geológico de um ambiente glaciomarinho, dominado por geleiras terminais responsáveis pela erosão de extensas áreas continentais e acúmulo de grandes quantidades de sedimentos. O deslocamento das massas de gelo ocasionou no transporte simultâneo de uma variada natureza composicional e granulométrica de litoclastos, inclusive na forma de grandes seixos e blocos, além de finos materiais gerados pela abrasão da geleira sobre o pavimento rochoso. A partir dos processos descritos, foram formados os diamictitos polimíticos matriz-suportados.

A interpretação do ambiente glaciomarinho é corroborada pelos seguintes argumentos:

- Presença de diamictitos maciços a pouco estratificados, na forma de corpos descontínuos e

espalhados por toda a área de estudo, que apresentam recorrência da sucessão sedimentar;

- Presença de litoclastos com natureza, composição e forma variadas incluindo granito, tonalito, dolomito, siltito, quartzito, etc.;
- Presença de clastos com estrias de abrasão em blocos de quartzito;
- Associação de diferentes formas de grãos de quartzo, que variam entre muito arredondados até muito angulosos na mesma porção da lâmina petrográfica, o que é interpretado como incorporação de sedimentos de áreas fontes proximais e distais pela geleira;
- Faciologia geral das rochas rudáceas e pelíticas, típica de associação de sedimentos que sofrem retrabalhamentos por processos marinhos rasos (atuação de ondas e marés) e
- Estreita relação de interdigitação lateral e vertical das rochas rudáceas e psamíticas com os pelitos de ambientes marinhos.

Diamictitos associados a ambientes glacio-continentais são pouco espessos (em geral menores que 50 metros), com restrita recorrência na sucessão sedimentar e apresentam faciologia distinta, sem retrabalhamento por processos marinhos.

Na porção final da geleira, devido às grandes massas de água geradas pelo degelo, estabeleceu-se uma planície de *outwash*, na qual ocorreu a lavagem de parte da matriz pelítica dos diamictitos e, conseqüentemente, aumento da proporção modal da fase psamítica, culminando na formação dos arenitos conglomeráticos polimíticos. Em decorrência da maior distância desses depósitos da área fonte, grande parte dos litoclastos maiores e mais densos foram depositados nas porções proximais da geleira e somente parte dos clastos de rochas pelíticas e quartzitos foram agregados ao arcabouço dos arenitos conglomeráticos.

O término da primeira associação de fácies sucede-se pela chegada dos sedimentos glaciais em ambiente costeiro, onde são retrabalhados pela ação de ondas. Dessa forma, quase que a totalidade da matriz remanescente é lavada, sobrando apenas grãos de quartzo e plagioclásio moderadamente selecionados que compõem os arenitos arcoseanos finos esbranquiçados. O caráter arcoseano desses arenitos, definido a partir da quantidade significativa de grãos de plagioclásio, corroboram com a fonte continental dos sedimentos.

Nos limites marginais das geleiras se desenvolveram ambientes favoráveis a precipitação química de fosfatos, nos quais foram depositadas às rochas da segunda associação de fácies. Esses ambientes possuíam condições médias de oxirredução, baixas temperaturas e pH ligeiramente alcalino, além de baixa atividade biológica, o que possibilitou o incremento da disponibilidade de P_2O_5 livre para formar os fosforitos e siltitos fosfatados. A sedimentação da Unidade Fosfática foi marcada pela combinação da precipitação química direta de fluorapatita e deposição de sedimentos pelíticos. Nas porções em que ocorrem os siltitos fosfatados, observa-se uma elevação nos teores de P_2O_5 e diminuição da carga pelítica conforme se aproxima do centro

das ocorrências, de forma que as lentes de siltitos fosfatados, geralmente, apresentam núcleos de fosforitos.

A deposição da terceira associação, diferentemente das duas associações superpostas, é diretamente influenciada por eventos de deglaciação. Com o derretimento das massas de gelo, decorre o aumento do nível eustático do mar e consequente transgressão marinha, dessa forma, são depositados os sedimentos pelíticos, marcados pela presença dos siltitos estratificados avermelhados e pelitos laminados variados. Uma pequena parcela de fosfatos, que não foram precipitados nas vizinhanças da geleira, são transportados para essa condição ambiental e com a influência de variações do nível do mar (em consequência de transgressões) são recolocados nas condições ideais de precipitação e formam lentes em meio aos siltitos, como sugere o bloco diagrama esquemático da Figura 3.11. A sucessão de processos deposicionais pode ser resumizada conforme a Tabela 3.1.

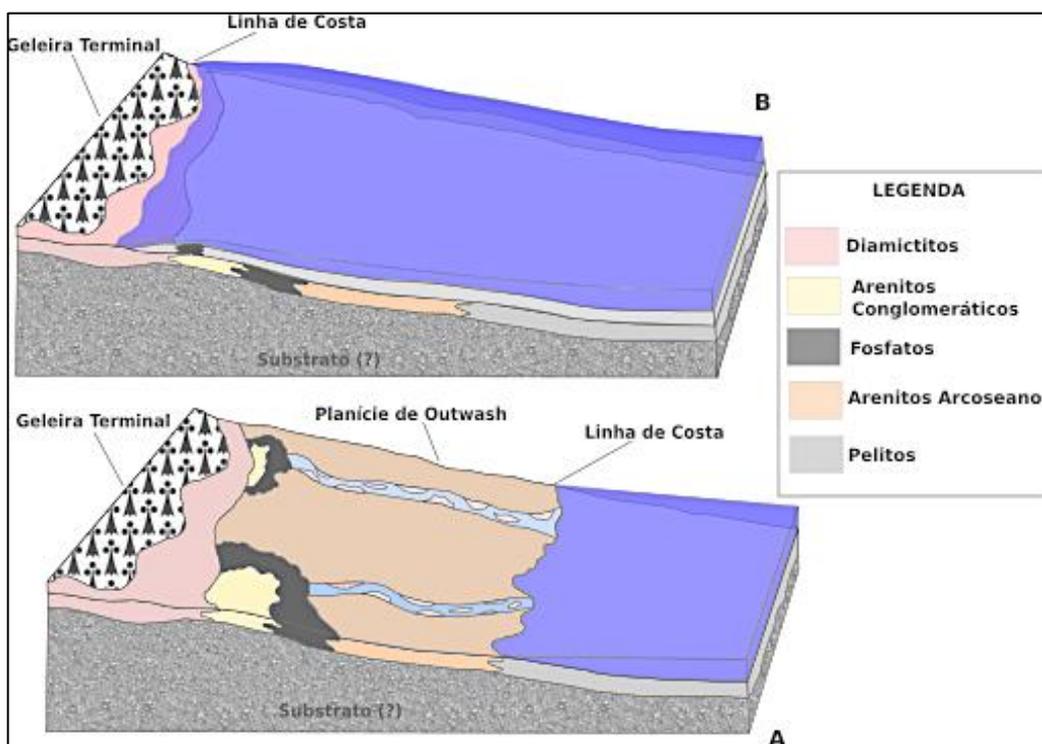


Figura 3.11 - Bloco diagrama representando os sistemas deposicionais da Formação Retiro. O bloco A mostra a seqüência deposicional das rochas que possuem aspectos genéticos diretamente relacionados à geleira terminal, enquanto B retrata às seqüências formadas a partir da transgressão marinha gerada pela deglaciação.

Associação de Fácies	Fácies	Sistemas Depositionais
Unidade Rudácea	Diamictitos Polimíticos Matriz Suportados	Preservação dos depósitos de base da geleira
	Arenitos Conglomeráticos Polimíticos	Outwash glacial incipiente
	Arenitos Arcoseanos Finos	Outwash glacial avançado
Unidade Fosfatada	Siltitos Fosfatados	Precipitação química de fluorapatita com participação de lamas terrígenas
	Fosforitos Laminados	Precipitação química de fluorapatita
	Fosforitos Brechados	Retrabalhamento pós deposicional das fácies de fosforitos laminados
	Silexitos	Substituição de prováveis carbonatos ou fosforitos por sílica.
Unidade Pelítica	Pelitos Avermelhados Estratificados	Estágios iniciais de transgressão marinha com grande aporte de sedimento
	Pelitos Variados Laminados	Estágios avançados de transgressão marinha com pouco aporte de sedimento

Tabela 3.1 - Tabela de relação entre as fácies observadas e seus respectivos sistemas deposicionais.

CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DAS FÁCIES FOSFATADAS DA FORMAÇÃO RETIRO

Neste capítulo é apresentada a descrição das fácies de rochas fosfatadas, além de breve discussão sobre a gênese destes depósitos a luz de dados faciológicos, mineralógicos e químicos. Três fácies são consideradas: siltitos fosfatados, fosforitos laminados, fosforitos brechados e silexitos as quais serão descritas de acordo com feições de campo e dados microscópicos.

A distribuição destas fácies não sugere um ciclo deposicional que se repete lateralmente, mas diferentes ciclos com forte relação com as fácies glaciogênicas descritas no capítulo anterior.

4.1 SILTITOS FOSFATADOS

Os siltitos fosfatados representam a fácies de maior expressão em relação às rochas da Unidade Fosfatada e afloram geralmente nas proximidades de morrotes suaves. Esses siltitos, quanto mais preservados do intemperismo, apresentam coloração escura predominante que contrasta com domínios minoritários de coloração esbranquiçada (Figura 4.1A).

Em termos macroscópicos, os siltitos fosfatados exibem laminações plano-paralelas descontínuas, de coloração preta, compostas por fosfolutitos e que apresentam forte reação ao molibdato de amônia (Figura 4.1B). O restante da rocha é formado basicamente por grãos terrígenos de granulometria silte e misturas silte-argila.

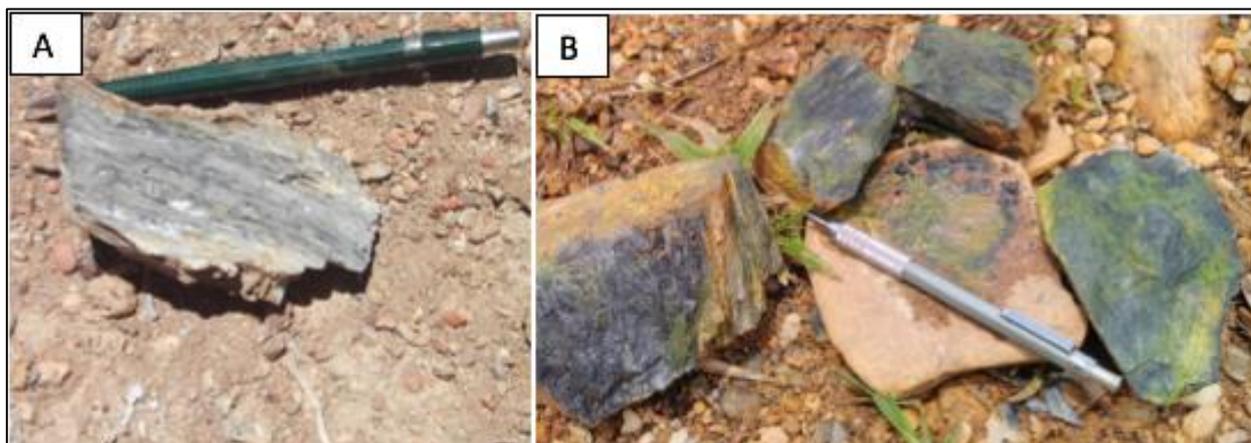


Figura 4.1 - (A) Amostra de silito fosfatado de coloração predominantemente escura com domínios de coloração esbranquiçada. (B) Reação do silito fosfatado ao Molibdato de Amônia, importante notar a concentração do produto esverdeado da reação nas porções mais ricas em lâminas de fosfolutito.

Conforme ocorre a atuação dos processos intempéricos, os siltitos são alterados e o fosfato é totalmente lixiviado. Em decorrência desse processo, os afloramentos mais preservados são encontrados somente em cortes recentes e a maior parte dos siltitos ocorre como saprolitos com colorações que variam do cinza esverdeado (Figura 4.2 A) ao amarelo pálido (Figura 4.2 B)

que apresentam pouca ou nenhuma reação ao Molibdato de Amônia.

Devido às espessas coberturas saprolíticas encontradas superpostas aos siltitos, que não apresentam reação ao molibdato de amônia, pode-se inferir, empiricamente, que os fosfatos da região possuem alta solubilidade e são removidos das porções superficiais com facilidade. Essa característica é corroborada pelo fato das fluorapatitas presentes nessas rochas serem de granulometria argila, o que aumenta a área de contato dos grãos com os fluídos meteóricos e consequente solubilização.

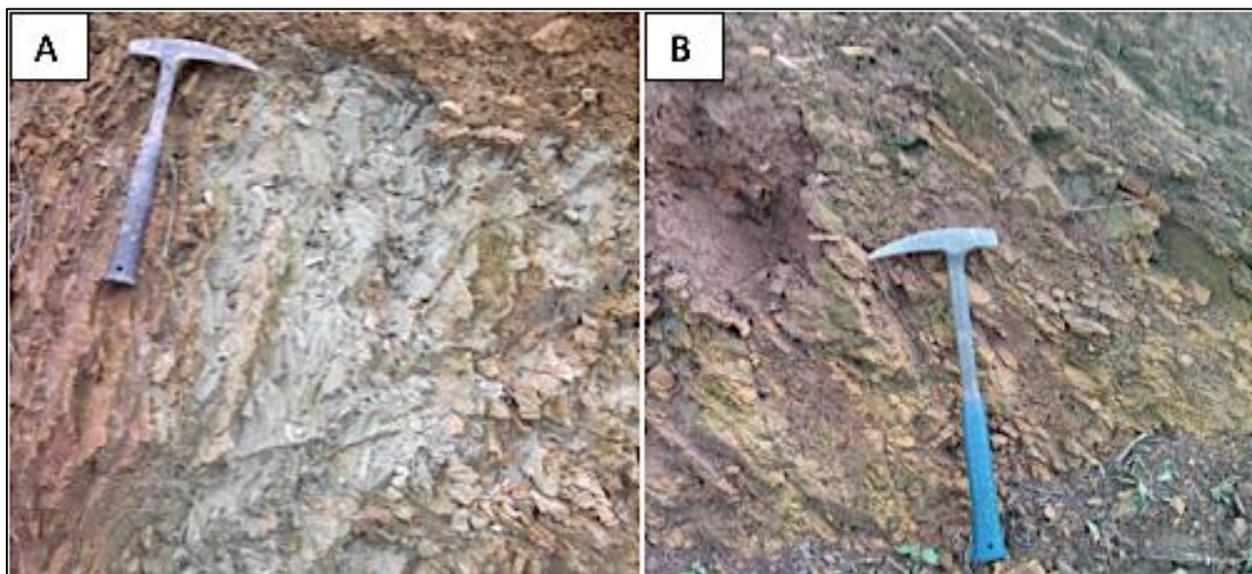


Figura 4.2 - (A) Afloramento alterado de siltitos fosfatados que adquirem coloração acinzentada e não apresentam reação ao Molibdato de Amônia. (B) Siltitos fosfatados alterados com coloração amarelada e pouca reação ao Molibdato de Amônia.

Em uma porção restrita da área, ocorrem raros siltitos com coloração escura homogênea, que apresentam reação tanto ao molibdato de amônia quanto ao ácido clorídrico. Esses siltitos marcam uma pequena contribuição local de lamas carbonáticas na sedimentação fosfática que, nesse caso, resulta em menores quantidades de P_2O_5 discriminadas por fracas reações ao molibdato de amônia, como mostra Figura 4.3.

Tratam-se de rochas finamente laminadas a estratificadas, muito ricas em matéria orgânica, com cor de rocha fresca preta e cor de rocha alterada ocre/amarelada. Amostras alteradas também evidenciam se tratar de fácies margosa, pois apresentam baixa densidade em função da lixiviação do carbonato.



Figura 4.3 - Siltito argiloso, calcífero (marga), de coloração escura (preta) homogênea com fraca reação ao Molibdato de Amônia.

Ao microscópio petrográfico, os siltitos fosfatados são compostos por cerca de 85% de grãos tamanho silte/argila de componentes terrígenos e 15% de fosfolutito que ocorre na forma de finas lâminas milimétricas distribuídas pervasivamente pela rocha. Comumente são observados intraclastos pelíticos com tamanho variando de 0,2 mm a 0,5 mm (Figura 4.4A) bordejados por fosfolutitos e com preenchimento de fraturas por finos cristais de quartzo e apatita, que em decorrência da semelhança entre o relevo e as cores de interferência desses minerais, tornam-se difíceis de distinção.

As lâminas de fosfolutito, por outro lado, contrastam com a porção terrígena e mostram uma estruturação que sugere a precipitação dos minerais de fosfato juntamente com a lama pelítica (Figura 4.4B). Essa feição é marcada pela alternância das lâminas entremeadas à parte pelítica juntamente com o festonamento dos intraclastos em fases sin-digenéticas.

Em função da sua natureza plástica, estas rochas apresentam-se bastante deformadas com microondulações e microdobras, além de uma clivagem espaçada que faz alto ângulo com o acamamento e laminação sedimentar.

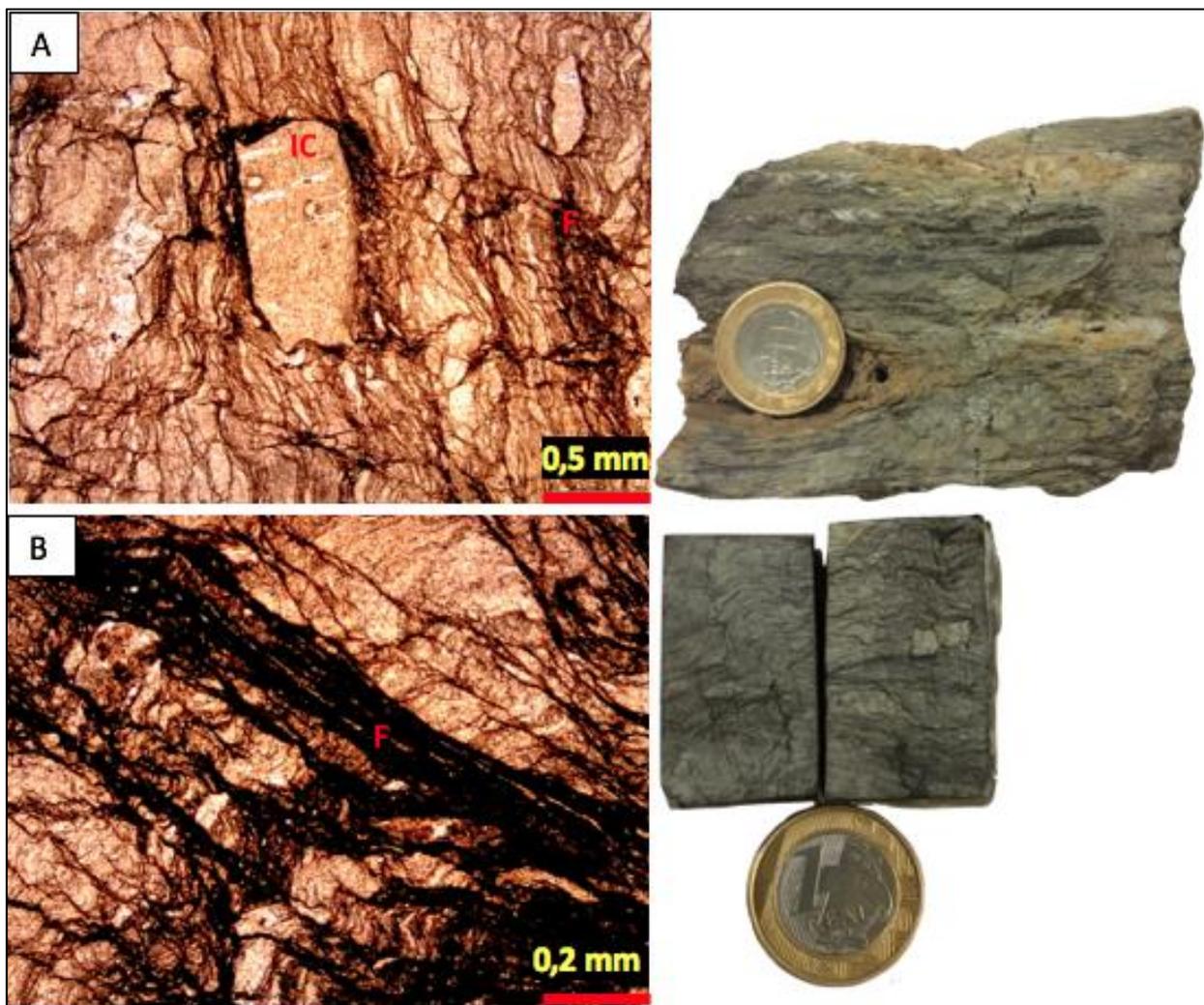


Figura 4.4 - (A) Fotomicrografia de siltito fosfatado mostrando o arranjo das lâminas de fosfolutito em meio a porção pelítica. Destaca-se ao centro o intraclastos pelítico com bordas de fosfolutito (IC = Intraclasto, F = Fosfolutito) (N// 1,25x). **(B)** Detalhe das lâminas de fosfolutito. (F = Fosfolutito) (N// 4x).

Os difratogramas de Raios-X dos siltitos fosfatados mostram que a porção pelítica dessas rochas é composta predominantemente por finos cristais de quartzo, clinocloro e muscovita além de rutilo, que por ser um mineral resistado acaba sendo transportado e depositado na bacia, enquanto a assembleia fosfática é formada apenas por fluorapatita (Figura 4.5). A presença desses minerais na porção pelítica sugere proveniência sedimentar a partir da erosão de fontes continentais, o que é corroborado pelos clastos presentes nas rochas da Unidade Rudácea.

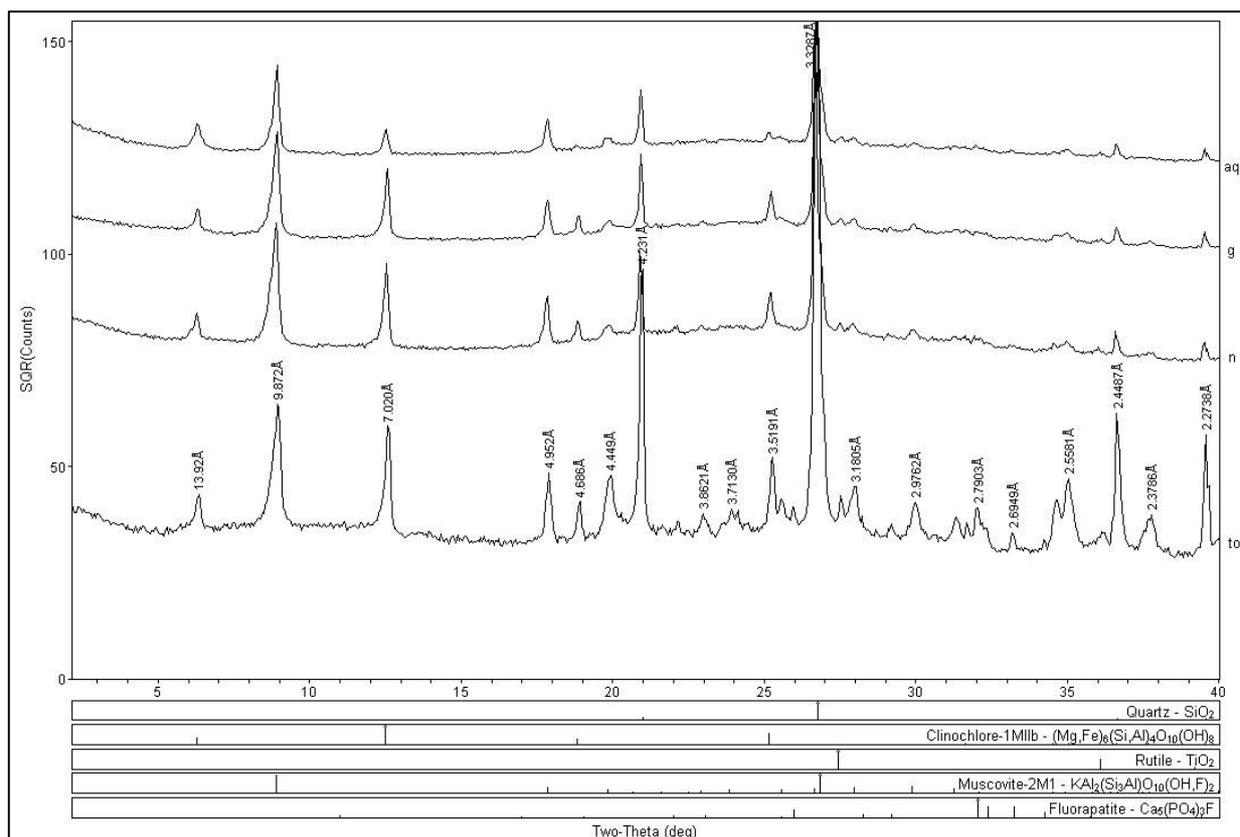


Figura 4.5 - Difratograma de Raios X representativo da mineralogia dos siltitos fosfatados. Importante notar a presença de fluorapatita como mineral de fosfato. (aq = Aquecida, g = Glicolada, n = Normal, tot = Total).

4.2 FOSFORITOS LAMINADOS

Os fosforitos laminados, ao contrário dos siltitos, ocorrem dispostos na área de estudo como morrotes densamente vegetados de vertentes suavizadas e encostas arredondadas. Essas rochas são caracterizadas pela intercalação de lâminas escuras de fosfarenitos com espessuras que variam de poucos milímetros até 1 cm e lâminas mais espessas de coloração bege pálido compostas por fosfolutitos (Figura 4.6A). Nas porções mais superficiais desses morros, os fosforitos afloram como pequenos blocos com intensa silicificação que possuem pouca ou nenhuma reação ao molibdato de amônia, mas que preservam as estruturas primárias (Figura 4.6B), no entanto, em alguns locais mais preservados do intemperismo podem ser encontrados blocos menos alterados que reagem fortemente ao molibdato de amônia.

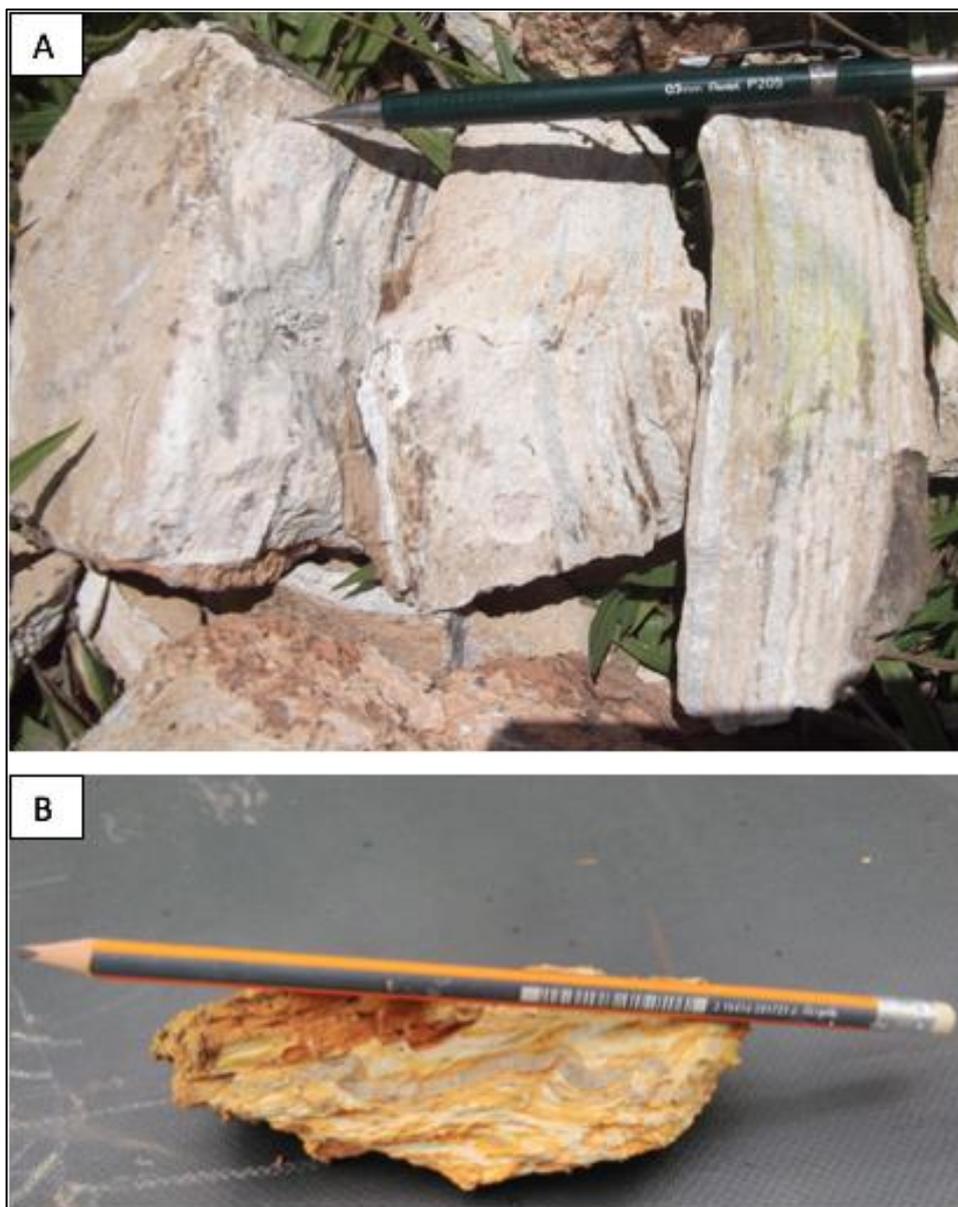


Figura 4.6 - (A) Blocos de fosforito laminados onde observa-se a intercalação entre lâminas claras e escuras. No bloco localizado à direita da imagem ocorre uma porção amarelada resultado da reação da rocha ao Molibdato de Amônia. (B) Fosforito laminado intensamente alterado, nesse estágio, os minerais fosfáticos já foram totalmente lixiviados, porém as estruturas são preservadas.

Em lâmina delgada, os fosfolutitos ocorrem na forma de domínios maciços onde se disseminam raros fosfointraclastos com tamanho médio de 0,1 mm (Figura 4.7A). A menor quantidade de fosfointraclastos, em conjunto com as maiores quantidades de fosfolutitos, marcam a transição entre as lâminas de fosfarenitos. Nas lâminas escuras, por sua vez, observa-se o expressivo aumento da quantidade de fosfointraclastos com tamanho variando de 0,1 mm a 0,3 mm e que formam uma porção de fosfarenitos facilmente identificada tanto em lâmina delgada, quanto em análise macroscópica (Figura 4.7B).



Figura 4.7 - (A) Fotomicrografia do aspecto geral dos fosforitos laminados ressaltando a intercalação entre os fosfolutitos e as lâminas de fosfarenito (FosA = fosfarenito, FosLu = fosfolutito) (N// 1,25x). (B) Detalhe da porção de fosfarenito mostrando a dominância de fosfointraclastos com tamanho e formas variadas (FosIC = Fosfointraclasto) (N// 4x).

Além dos intraclastos fosfatados, os fosfarenitos apresentam pequena porosidade e fraturas que estão preenchidas por finos cristais de wavellita. Os cristais de wavellita estão dispostos de forma radial, sugerindo o preenchimento posterior das cavidades (Figura 4.8).

Diferentemente dos siltitos fosfatados, na qual as laminações fosfáticas apresentam-se totalmente isotrópicas, nos fosforitos laminados, toda a assembleia fosfática apresenta coloração avermelhada que sugere ações intempéricas mais evidentes e presença de coloides de óxido de ferro.

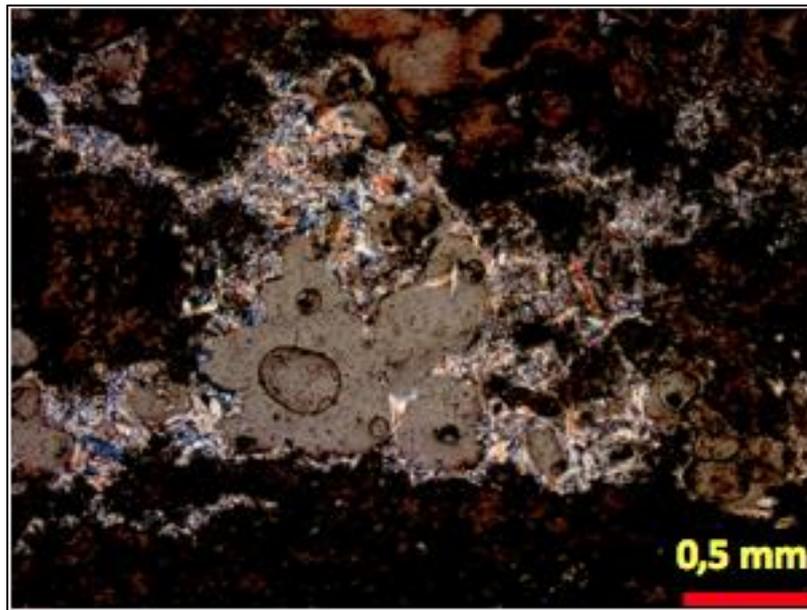


Figura 4.8 - Fotomicrografia de finos cristais de wavellita preenchendo poros e fraturas da porção fosfarenítica dos fosforitos laminados (NX 4x).

Os efeitos do intemperismo pervasivo dos fosforitos laminados também são identificados nos difratogramas de Raios-X, onde a mineralogia é basicamente composta por argilominerais hidratados neoformados como illita e caulinita, além de minerais residuais como o quartzo, e o rutilo, além de wavellita e fluorapatita que representam os minerais de fosfato dessas rochas (Figura 4.9).

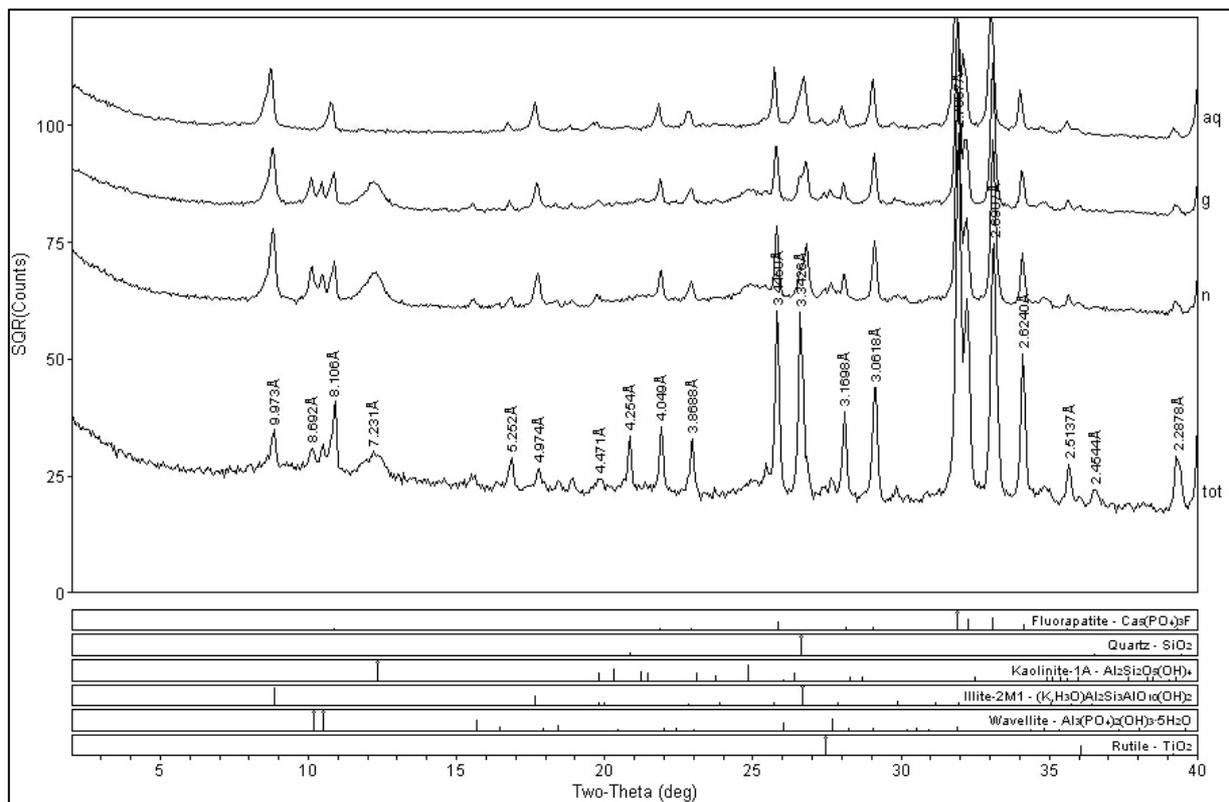


Figura 4.9 - Difratograma representativo da assembleia mineralógica dos fosforitos laminados. Importante notar que além de fluorapatitas, também estão presentes wavellitas (aq = Aquecida, G = Glicolada, tot = Total).

4.3 FOSFORITOS BRECHADOS

A última fácies da Unidade fosfatada é caracterizada pela ocorrência de fosforitos brechados. Essas rochas estão geralmente dispostas como pequenos afloramentos de blocos com hábito botrioidal, intensamente silicificados, nas porções centrais dos morros de fosforitos laminados, que se diferenciam devido a não preservação das estruturas laminares primárias e por possuírem colorações que variam de vermelho pálido a esbranquiçado (Figura 4.10A). Esses blocos apresentam texturas concrecionárias e nodulares marcadas pela presença de intraclastos de fosforitos laminados entrelaçados por matriz de fosfolutitos de coloração esbranquiçada, onde ainda podem-se observar domínios de segregação quartzosa e preenchimento de cavidades pelo mesmo mineral.

As reações ao molibdato de amônia ocorrem por toda a rocha, porém são mais proeminentes nos locais dominados pela matriz (Figura 4.10B), sugerindo o acúmulo supergênico de P_2O_5 nessas porções.

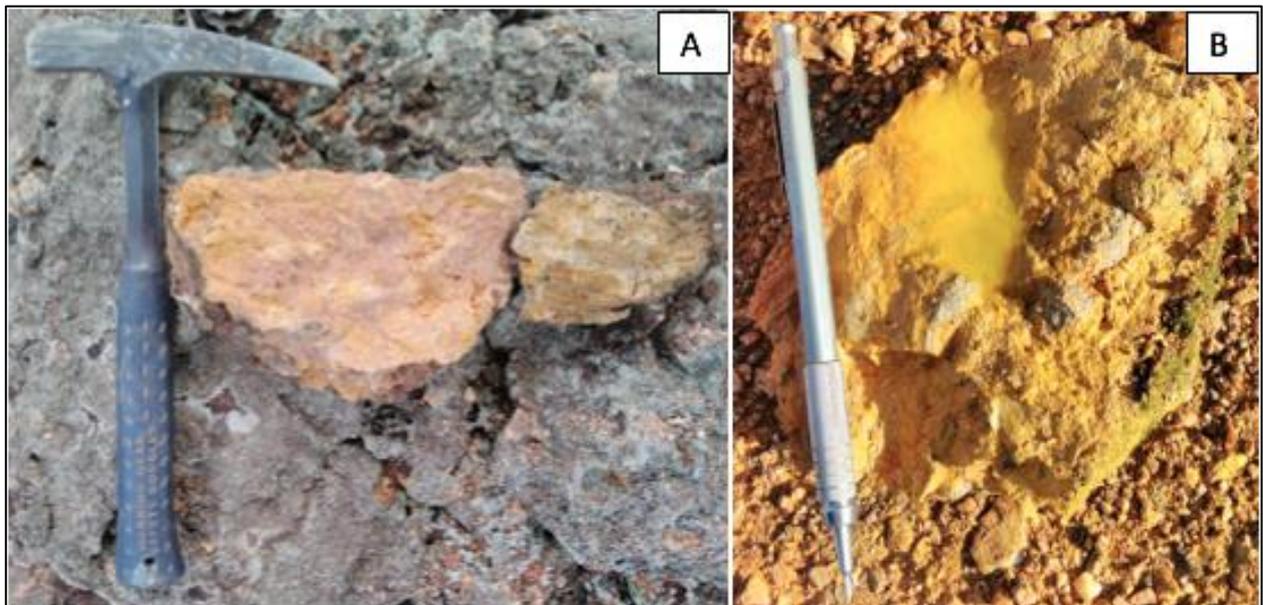


Figura 4.10 - (A) Aspecto macroscópico de fosforito brechado. Nas porções mais claras, notam-se a presença de nódulos formados durante a etapa de pedogênese. (B) Reação proeminente do fosforito brechado ao Molibdato de Amônia.

O aspecto friável dessas rochas dificulta consideravelmente a confecção de seções delgadas, porém um dos blocos mais preservados foi passível de ser laminado. Em lâmina, esses fosforitos são majoritariamente (75%) compostos por uma matriz de fosfolutitos de coloração acastanhada, devido a oxidação de coloides de ferro, onde estão imersas porções de cristais de quartzo (25%) resultantes da segregação de sílica durante os processos de lixiviação da rocha (Figura 4.11A). Os cristais de quartzo apresentam tamanhos variando de 0,2mm a 1,0mm e compõem bolsões granulares de bordas bem marcadas (Figura 4.11B) que corroboram com a ideia de um preenchimento posterior a partir da circulação de fluido silicoso. Localmente

ocorrem grãos mais arredondados que são interpretados como clastos detríticos, definidos como extraclastos. Assim, pode-se considerar que a sílica nesta fácies ocorre como endoganga (sílica em bolsões angulosos) e exoganga (fragmentos detríticos mais arredondados).

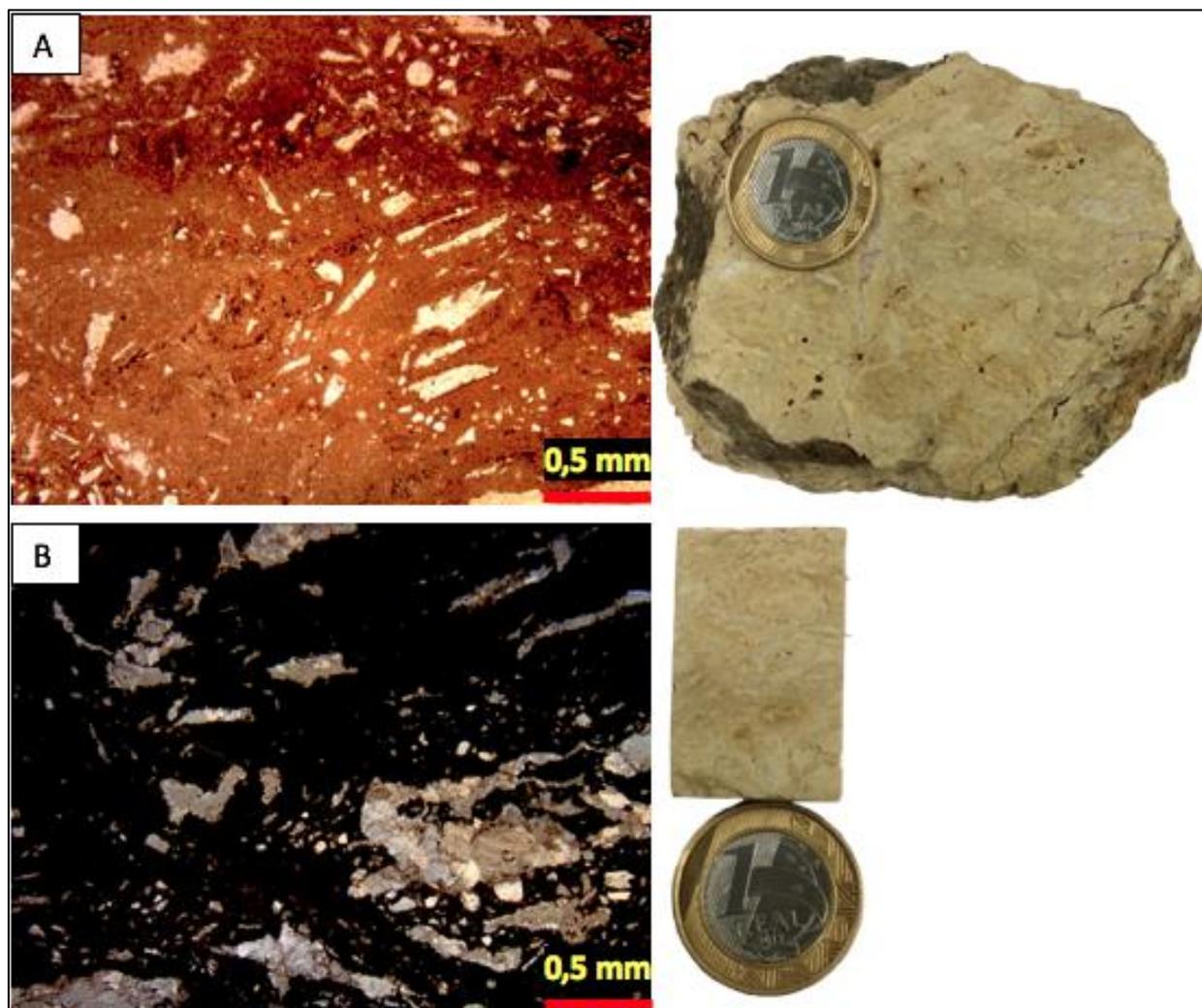


Figura 4.11 - (A) Fotomicrografia de fosforito brechado mostrando a articulação entre a matriz de fosfolutitos, de cor acastanhada, e dos domínios preenchidos por sílica (N// 1,25x). (B) Detalhe das porções silicosas evidenciando a presença de bordas abruptas e bem definidas entre esses domínios e da matriz fosfática (NX 1,25x).

Assim como nos fosforitos laminados, os resultados de difratometria de Raios-X dos fosforitos brechados identificam caulinita como argilomineral neoformado e muscovita, ferroactinolita, quartzo e fluorapatita como minerais detríticos. Os picos relativos à fluorapatita, análogo ao difratograma anterior, são bem marcados na análise de rocha total e sugerem a possibilidade do intercrescimento desse mineral com o quartzo nas porções silicosas (Figura 4.12). Esse fato é corroborado pela petrografia, sendo que em algumas das porções silicosas observam-se finos cristais de apatita, que são de difícil distinção tendo em vista a similaridade das características microscópicas entre os dois minerais.

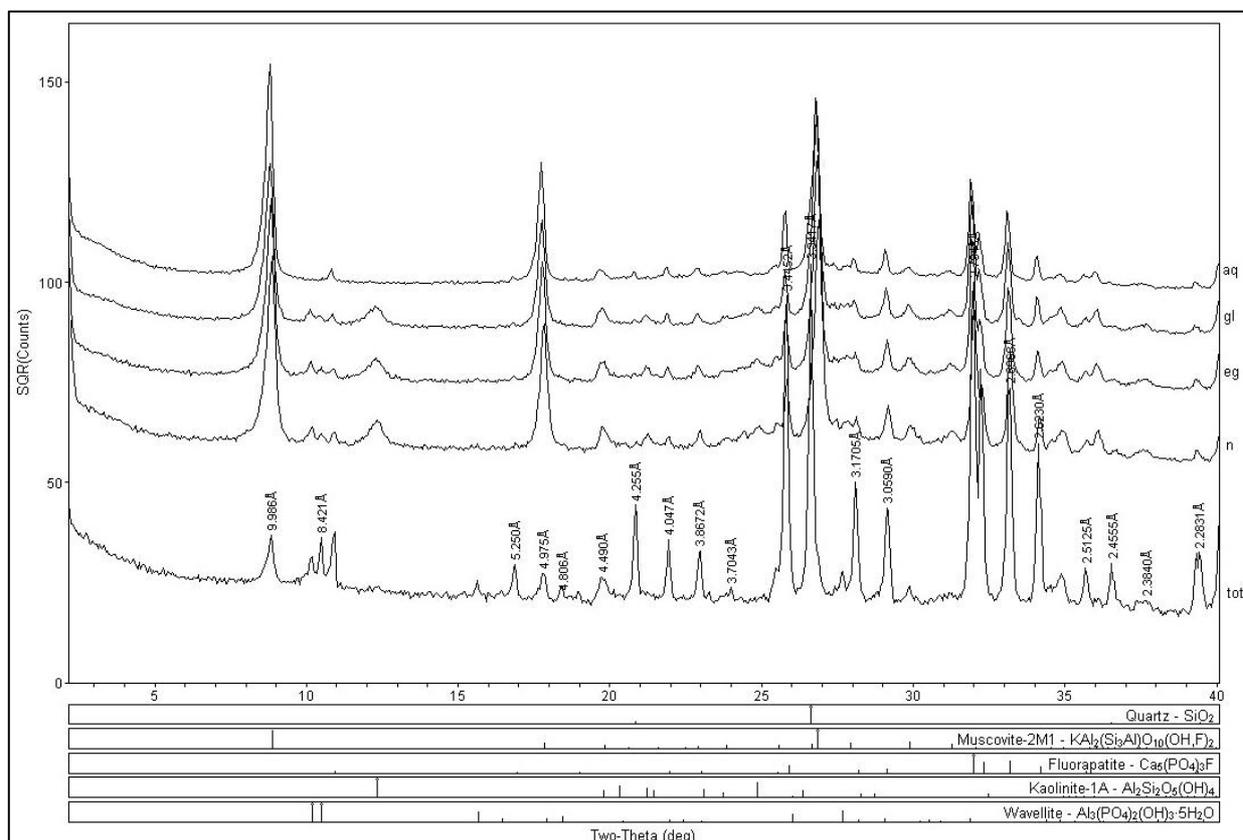


Figura 4.12 - Difratoograma representativo dos fosforitos brechados. Importante notar a forma dos picos das fluorapatitas.

Por fim, a última fácies presente na Unidade fosfatada é composta por extensas serras de silexitos que recortam toda a área e que apresentam uma discreta correlação com as rochas fosfatadas. Esses silexitos possuem aspectos brechados (Figura 4.13A) que denotam a substituição total por sílica de rochas químicas precursoras como carbonatos ou mesmo fosforitos originalmente brechados (Figura 4.13B).



Figura 4.13 - (A) Aspecto brechado geral dos silexitos da Formação Retiro. (B) Detalhe das concreções silicosas que sugerem a substituição completa de blocos de rochas carbonáticas por sílica.

4.4 FOSFOGÊNESE

Grandes acumulações de rochas fosfáticas sedimentares ocorreram em escala global e em idades bem definidas do tempo geológico (Donnelly, 1990). Importantes picos fosfogenéticos foram registrados durante a transição Proterozoico/Cambriano. Segundo Cook & Shergold (1984), esses picos estariam relacionados com o aumento da concentração de fósforo disponível durante o Proterozoico, em decorrência do amplo desenvolvimento de ambientes oceânicos anóxicos com maior capacidade de armazenamento de P_2O_5 em reservatórios oceânicos profundos, seguido da influência de correntes de ressurgência (*upwelling currents*), responsáveis pelo transporte dessas águas para condições ambientais mais rasas e oxidantes, propícias a deposição do fosfato. Cook (1992) suporta a ideia de que a elevação do nível do mar causada pela deglaciação possa ser um fator de influência direta na circulação do fósforo solúvel e sugere uma intrínseca correlação entre eventos de fosfogênese e glaciações.

Na transição Neoproterozoico/Paleozoico (Figura 4.14), o pico de maior abundância de depósitos fosfáticos é coincidente com o Evento de Oxidação Neoproterozoico (*Neoproterozoic Oxidation Event* - NOE) que permitiu maior intemperismo químico das rochas continentais, principalmente dos núcleos carbonatíticos ricos em P_2O_5 , aumentando ainda mais a contribuição fosfática para as águas oceânicas (Papineau, 2010; Pufahl, 2010; Pufahl & Hiatt, 2012).

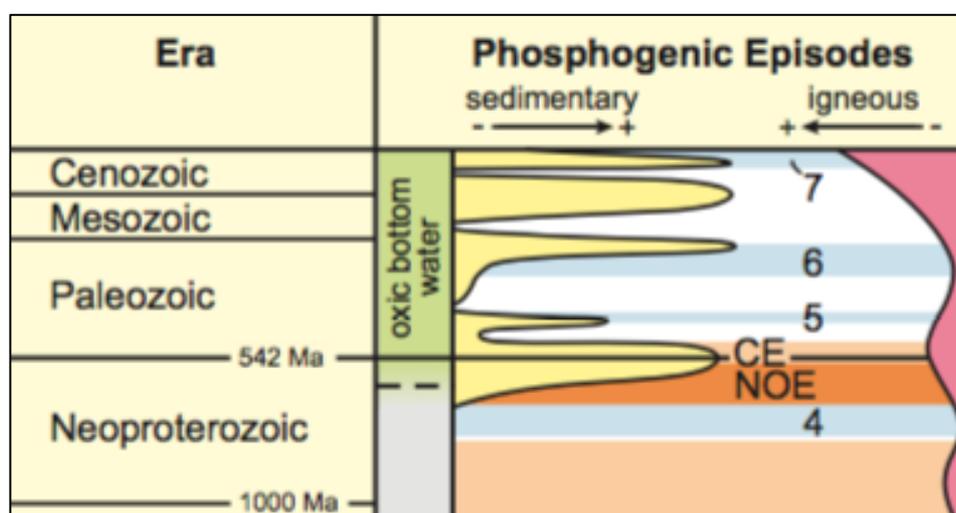


Figura 4.14 - Gráfico modificado de Pufahl & Groat (2016) mostrando a relação entre a abundância dos depósitos de fosfatos no intervalo entre o Neoproterozoico e o Cenozoico. Ressalta-se o pico da transição Proterozoico/Cambriano. (4 - Glaciação neoproterozoica, 5 - Glaciação ordoviciana, 6 - Glaciação permiana, 7 - Glaciação neogênica, CE - Explosão da vida cambriana, NOE - Evento de Oxidação neoproterozoico).

Esses eventos foram determinantes para a gênese dos depósitos de fosfato sedimentar mais amplamente disseminados e conhecidos no mundo, devido aos seus aspectos econômicos favoráveis, cuja gênese foi controlada pelos eventos glaciais e pelas correntes marinhas ascendentes a partir de águas profundas (Teoria da Ressurgência proposta por Kazakov 1937).

No caso do depósito proterozoico de Coromandel se considera que esses mesmos mecanismos vinculados ao evento glacial foram de extrema importância no controle da fosfogênese. Especificamente no caso deste depósito, as altas concentrações de P_2O_5 foram acarretadas pelo intemperismo químico de rochas fontes continentais, em associação com a intensa erosão e transporte glacial, além das condições deposicionais propícias provocadas pela presença da geleira permitindo o acúmulo anômalo de fosfato.

Algumas observações corroboram a interpretação do caráter continental da área fonte dos fosfatos do depósito de Coromandel. A presença de minerais do grupo da clorita como clinocloro e do grupo dos anfibólios como a ferroactinolita, identificados nos difratogramas de Raios-X, sugere possível participação na proveniência sedimentar a partir da desagregação de rochas ferro-magnesianas com conteúdos de fósforo, que foram carregados e acumulados nas proximidades das geleiras terminais.

As condições deposicionais desenvolvidas nas porções proglaciais influenciaram diretamente a precipitação química direta do fosfato, na forma de finos cristais de fluorapatita amorfa (colofanita), que de acordo com a sua proporção modal em relação ao conteúdo de siliciclásticos deu origem aos siltitos fosfatados e aos fosforitos da Unidade Fosfatada. Nesse ambiente predominavam condições intermediárias à ligeiramente mais oxidantes de oxirredução, com pH mais elevados (alcalinos) e mais baixas temperaturas que resultam na diminuição da solubilidade do fosfato e sua imediata precipitação.

Outro fator que deve ser considerado com relação à questão genética das fácies fosfatadas é a restrita produção orgânica em função das baixas temperaturas das águas. Neste contexto glacial/pró-glacial as águas frias do degelo dificultam o desenvolvimento da atividade orgânica marinha e assim o PO_4^{2-} como um nutriente essencial teria seu consumo limitado, de forma que, a maior parte do fosfato existente na bacia possa ter depositado quimicamente ou em associação com terrígenos finos. Caso se tratasse de uma plataforma com águas quentes, seria esperado maior volume de rochas carbonáticas, e conseqüente maior consumo do PO_4^{2-} , assim dificultando seu acúmulo nas rochas sedimentares.

Os siltitos fosfatados foram depositados em situações nas quais prevaleceu a participação de sedimentos terrígenos, com proporções subordinadas de fosfolutitos, que se concentraram em finas laminações e resultaram em baixos teores de P_2O_5 que variam entre 2 e 9%, sendo que uma das amostras apresentou teor de 16%. Os fosforitos laminados, por outro lado, foram formados predominantemente pela precipitação dos minerais de fosfato com pouca contribuição pelítica. Essas rochas foram geradas a partir da associação cíclica de momentos de menor energia deposicional, nas quais foram precipitadas as laminações de fosfolutito, e momentos de maior agitação que retrabalharam as porções inconsolidadas de fosfolutitos formando intraclastos

fosfáticos e laminações de fosfarenitos. Os teores de P_2O_5 dessas rochas flutuam entre 19 e 24%, sendo que uma das amostras possui um valor anômalo de 34%, possivelmente resultado da presença de cavidades preenchidas por cristais de wavellita.

A terceira fácies representada pelos fosforitos brechados é interpretada como a materialização do retrabalhamento pós-deposicional das fácies de fosforitos laminados em função de correntes ou de instabilidades nas margens das principais lentes de fosforitos. O aumento dos teores de P_2O_5 (em cerca de 3,5%, com relação aos fosforitos laminados) é atribuído à reconcentração das fases fosfatadas com relação ao material pelítico que é mais facilmente transportado para deposição por agradação junto às fácies finas (mais distais).

Na Tabela 4.1 são mostrados os valores de referência para elementos maiores das diferentes fácies de rochas fosfatadas.

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI	TOTAL
LTC - 09B	65,89	14,52	1,94	5,02	0,99	0,41	3,09	0,77	2,65	0,03	6,07	101,39
LTC - 11B	65,71	16,13	2,08	4,29	0,64	0,49	3,88	0,81	1,66	0,03	5,31	101,02
LTC - 53	60,28	10,77	0,71	4,23	8,33	0,25	1,95	0,48	8,80	0,02	4,91	100,73
LTC - 89A	49,33	13,21	3,06	4,87	10,61	0,44	3,39	0,66	9,06	0,03	5,17	99,82
LTC - 11C	27,66	14,84	1,31	4,64	21,33	0,29	3,69	0,70	19,95	0,02	6,08	100,51
LTC - 26	11,06	3,79	0,31	1,28	44,23	0,30	0,52	0,17	34,29	0,06	4,30	100,29
LTC - 30	26,82	10,25	0,67	3,45	28,12	0,28	1,65	0,42	22,19	0,08	5,51	99,43
LTC - 46	31,03	4,50	0,51	2,22	31,54	0,29	1,14	0,18	24,59	0,26	3,35	99,61
LTC - 90A	24,14	4,88	0,66	1,85	35,44	0,36	1,36	0,23	27,32	0,09	3,94	100,28
LTC - 90B	26,01	3,29	0,56	1,96	36,48	0,28	1,00	0,30	26,86	0,09	3,15	99,89
LTC - 90C	19,72	2,01	0,40	1,00	42,37	0,29	0,45	0,10	30,68	0,02	3,40	100,43
TB - 21	15,91	4,87	0,49	1,70	40,59	0,30	0,94	0,21	30,32	0,04	4,44	99,81
TBG	37,44	21,35	0,56	6,42	0,76	0,23	1,22	0,70	16,07	0,07	15,03	99,85
TGP	33,95	24,24	0,23	2,70	0,27	0,22	0,52	0,20	20,56	0,01	17,62	100,52

Tabela 4.1 - Óxidos, em porcentagem, dos elementos maiores das rochas fosfatadas. Importante notar as concentrações de P_2O_5 das três fácies distintas. (Azul - Siltitos Fosfatados, Verde - Fosforitos laminados, Vermelho - Fosforitos Brechados). Análises por Fluorescência de Raios X.

Em relação aos demais elementos, os dados mostram-se coerentes com as assembleias mineralógicas das fácies fosfatadas determinadas pelos difratogramas de Raios-X. Os siltitos fosfatados apresentam altos conteúdos de sílica, alumínio e potássio que refletem a presença de maiores quantidades de quartzo e muscovita nessas rochas. De forma análoga, nos fosforitos laminados e brechados há aumento da quantidade de cálcio juntamente com fósforo, resultado da presença de maior quantidade de fluorapatita, além de valores variados de alumínio, que marcam as amostras mais ricas em wavellita e caulinita, mais illita nas amostras com valores um pouco mais ressaltados de potássio.

CAPITULO 5 - DISCUSSÕES

Este capítulo deverá abordar os contrastes estratigráficos das rochas da área estudada com outras rochas metassedimentares presentes na porção externa da Faixa Brasília, apresentar uma breve discussão sobre a evolução da Bacia Vazante e exibir breve comparação entre os diferentes tipos de depósitos de fosfatos sedimentares presentes na região, além dos vetores exploratórios das ocorrências de fosforitos e siltitos fosfatados da área em estudo.

5.1 ESTRATIGRAFIA REGIONAL

O conjunto de dados obtidos, tanto na etapa pré-campo, quanto depois de realizados os trabalhos de campo possibilitam o enquadramento das rochas encontradas como pertencentes ao Grupo Vazante e mais especificamente à Formação Retiro, como mostrado no mapa geológico do Apêndice 2.

A partir da descrição de campo das litologias encontradas é apresentada uma série de características que corroboram tal interpretação e que afastam a possibilidade de a estratigrafia regional ser atribuída ao Grupo Bambuí, como sugerem Signorelli *et al.*, (2013) e Féboli & Ribeiro (2013). A primeira diferença marcante decorre do fato de que os diamictitos da Formação Retiro são derivados da sedimentação em um ambiente glaciomarinho ou glacial transicional com retrabalhamento em plataforma marinha rasa, sendo assim, esses apresentam características marcantes de depósitos pró-glaciais (Boulton & Deynoux, 1981), diferentemente dos diamictitos da Formação Jequitaí, que exibem fácies de ambiente eminentemente glacial continental na Faixa Brasília (Martins-Ferreira *et al.*, 2013). Dentre essas características destacam-se a forma de ocorrência dessas rochas como corpos descontínuos individualizados de pequena espessura e estruturação maciça (<10% da massa exibe estratificação), além da associação com fácies da planície de *outwash*, marcadas pela interdigitação com arenitos conglomeráticos e arenitos arcoseanos.

Segundo uma série de trabalhos clássicos como Costa & Branco (1961), Dardenne (1978), Neves & Alkmin (1993), o Grupo Bambuí representa uma sequência predominantemente pelito-carbonatada. A única fácies com característica psamítica ocorre no topo e é marcada pelos arcóseos da Formação Três Marias. De forma contrária, a presença de sedimentos psamíticos é proeminente na área de estudo. Grãos de quartzo com granulometria fina a média são componentes majoritários, tanto nos arenitos conglomeráticos quanto nos arenitos arcoseanos, o que não respalda a composição de uma sequência formada por rochas pelíticas e carbonática, como aqueles pertencentes à base do Grupo Bambuí.

Por ser uma sequência pelito-carbonatada, o Grupo Bambuí mostra uma alternância de formações pelíticas e formações carbonáticas, sendo que a sua base, a Formação Sete Lagoas, sempre que descrita na literatura, é marcada pela ocorrência de rochas calcárias ou dolomíticas que mesmo onde não ocorre de forma contínua com extensos afloramentos, representam expressivas ocorrências na forma de lentes decamétricas até quilométricas (Uhlein *et al.*, 1999; Martins-Neto *et al.*, 2001). Por outro lado, na área de estudo, a presença de carbonatos é ínfima. Um único bloco de calcário micrítico escuro de dimensões reduzidas, fora de escala cartográfica, foi encontrado em meio à afloramentos de siltitos fosfatados (Figura 5.1 A e B). De acordo com essas características, esse afloramento foi interpretado como uma lente formada a partir da precipitação de lamelas carbonáticas em meio aos siltitos fosfatados.



Figura 5.1 - (A) Único afloramento de rocha carbonática da área de estudo, onde observa-se a ocorrência de bloco de calcário micrítico escuro. (B) Detalhe do bloco mostrando aspecto micrítico e laminação plano paralela dobrada no calcário.

O enquadramento geológico das ocorrências de rochas fosfatadas representa outra ferramenta de distinção entre os Grupos Vazante e Bambuí, tendo em vista que essas rochas exercem a função de camada estratigráfica guia. No Grupo Bambuí, os siltitos fosfatados e fosforitos ocorrem hospedados na Formação Sete Lagoas, interdigitados com siltitos próximo às rochas da Suíte Aurumina. No depósito de Coromandel, a correlação mais marcante das rochas fosfatadas se dá com as litologias glaciogênicas da Unidade Rudácea, sendo que são comuns os contatos diretos entre as duas unidades, com fosforitos imediatamente acima de diamictitos.

Além dos aspectos estratigráficos e litológicos, os aspectos estruturais e metamórficos, mesmo que não em termos gerais, também auxiliam na classificação das rochas da área de estudo como pertencentes ao Grupo Vazante. Ao longo da superfície de erosão dos afloramentos observados em campo, ocorre uma espessa aglomeração de cascalho de quartzo, provenientes da desagregação e acumulação de *boudins* de quartzo.

A presença desses *boudins* reflete diretamente o soterramento e a intensidade dos eventos metamórficos superimpostos às rochas. No caso do Grupo Bambuí, no qual são atribuídos graus muito baixos de metamorfismo, essa camada de cascalho não é observada, o que é corroborado pelos perfis intempéricos, com ausência ou rara presença de clastos de quartzo, sugerindo que a área de estudo encontra-se em uma porção de metamorfismo um pouco mais elevado que o do Grupo Bambuí.

A última diferença observada entre estas unidades estratigráficas decorre do fato de que mesmo em baixo grau metamórfico, a deformação das rochas do Grupo Bambuí resulta em suaves dobramentos com o desenvolvimento de clivagens espaçadas relacionadas ao seu plano axial (Dardenne, 2000). Essa clivagem intercepta ortogonalmente os planos de acamamento, resultando no desmembramento das rochas na forma de pequenos blocos losangulares, vulgarmente chamados de “bolachas”. De forma contrária, na área de estudo, as rochas encontradas apresentam estruturação mais maciça com a presença de poucos planos de discontinuidades, em geral paralelos ao plano de acamamento, que permitem o desmembramento das rochas em blocos de tamanho decimétrico.

As principais diferenças entre as unidades que hospedam depósitos fosfatados estão sumarizadas na Tabela 5.1.

Grupo Bambuí	Grupo Vazante
Unidade glacial basal marcada por fácies de ambiente glaciocontinental e glaciomarinho	Unidade glacial basal marcada por fácies de ambiente glaciomarinho (glacial transicional) com retrabalhamento em plataforma rasa
Sucessão pelito-carbonatada com presença de psamitos apenas no topo (Formação Três Marias)	Sequência pelito-carbonática com presença comum de fácies psamíticas
Expressiva presença de carbonatos na base (Formação Sete Lagoas)	Ausência de carbonatos na base (Formação Retiro)
Rochas fosfatadas da base hospedadas na Formação Sete Lagoas e intrinsecamente relacionadas a paleocanais no embasamento granítico	Rochas fosfatadas da base hospedadas na Formação Retiro intensamente associadas a Unidade Rudácea
Grau metamórfico muito baixo a ausente na porção externa da Faixa Brasília	Grau metamórfico muito baixo a anquimetamórfico na porção externa da Faixa Brasília
Presença de clivagem espaçada ortogonal ao acamamento que não permite a coleta de amostras de mão	Estruturação mais maciça que permite a obtenção de amostras de mão mesmo em exposições intemperizadas

Tabela 5.1 - Aspectos utilizados para a diferenciação entre as rochas dos grupos Bambuí e Vazante.

5.2 EVOLUÇÃO DA BACIA VAZANTE

As controvérsias estratigráficas e geocronológicas resultam em múltiplas interpretações e modelos de evolução para o Grupo Vazante. Segundo Marques *et al.*, (2015), existem 4 modelos na literatura, baseados em metodologias distintas (estratigrafia, geocronologia e geologia isotópica) que sugerem diferentes ambientes tectônicos de formação e etapas de preenchimento da bacia Vazante.

Dardenne (2000) sugere a correlação entre os grupos Bambuí e Vazante e discute, a partir de datações Pb/Pb em cristais de galena do depósito de Morro Agudo, idades que variam entre 1.2 Ga e 0,65 Ga (Freitas-Silva & Dardenne, 1997). As idades mais antigas indicam o momento no qual o Pb foi separado do sistema e não a cristalização do mineral, desta forma, esses dados representariam a idade de sedimentação anômala de uma bacia do tipo foreland localizada em uma zona de rápida subsidência, nos estágios iniciais de *uplift* da Faixa de Dobramentos Brasília.

Por outro lado, Pimentel *et al.*, (2011) trazem a luz dados de proveniência U/Pb em zircões, realizadas por Rodrigues *et al.*, (2008), nas quais as idades encontradas para as formações basais do Grupo Vazante apresentam uma distribuição dominante de áreas fontes paleoproterozoicas, com presenças subordinadas de zircões de fontes mesoproterozoicas, sendo que os grãos concordantes mais jovens foram encontrados na Formação Rocinha e limitam a idade máxima de deposição para os sedimentos da base do grupo em 0,94 Ga. Os autores interpretam essas características geocronológicas como similares às encontradas para os grupos Canastra e Paranoá, e sugerem que esses três grupos poderiam representar sequências de margem passiva da porção sul da plataforma continental da Faixa Brasília.

Outra abordagem da evolução da bacia Vazante baseia-se nas correlações estratigráficas, geocronológicas e de proveniência feitas por Alkmim & Martins-Neto (2012). Esses autores consideram que os Grupos Vazante e Canastra, juntamente com a porção basal do Grupo Ibiá (Formação Cubatão) possam ser correlatos ao ciclo de 1ª ordem de uma sequência denominada de Macaúbas. A Sequência Macaúbas engloba as unidades neoproterozoicas mais antigas conhecidas, tanto da bacia São Francisco, quanto do aulacógeno Paramirim e, na porção relativa ao Grupo Vazante, representa o estágio de *rift* de idade criogeniana, que se instalou entre os Crátons do São Francisco e Congo, formando um golfo e uma bacia do tipo “ Mar Vermelho”.

Por fim, mais recentemente, Misi *et al.*, (2014) com base em análises de isótopos de Re/Os realizadas por Azmy *et al.*, (2008) e Geboy *et al.*, (2013) concluem que ao menos uma parte da sucessão do Grupo Vazante apresenta idade mesoproterozoica a partir de idades que variam de 0,9 Ga a 1,1 Ga que foram obtidas em amostras de folhelhos da Formação Morro do Calcário, porção superior do Grupo Vazante. Por outro lado, os autores concordam com os valores de idades U/Pb neoproterozoicas obtidas por Rodrigues *et al.*, (2012) para as formações

basais (Formação Retiro e Rocinha). Portanto, a bacia Vazante é interpretada como uma sucessão localizada, estratigraficamente, entre a margem passiva do Grupo Paranoá e da bacia intracontinental do Grupo Bambuí, na qual a articulação inversa da estratigrafia é estruturalmente controlada pela presença de “*thrust fault*” no topo da Formação Rocinha.

Sendo assim, a partir da ampla quantidade de dados existentes na literatura, podem-se definir alguns critérios comparativos discriminantes que sugerem outra interpretação evolutiva da bacia Vazante. Esses critérios podem ser ranqueados em 5 diferentes tópicos de discussão que compreendem os aspectos estratigráficos (comparação entre colunas estratigráficas clássicas), geocronológicos (comparação entre idades de zircão detrítico), metalogenéticos (comparação entre o potencial mineral e ocorrências), evolução da bacia (padrão deposicional, tectônica sin-deposicional e tipo de subsidência) e metamorfismo que afetou os grupos Bambuí, Vazante e Paranoá na porção externa da Faixa Brasília.

Em termos estratigráficos gerais, a sucessão de rochas do Grupo Vazante possui características similares às observadas no Grupo Bambuí. Ambas as unidades litoestratigráficas apresentam o registro preservado de eventos glaciais em sua base, fato demarcado pelos diamictitos das Formações Jequitai e Retiro, além de serem sequências majoritariamente compostas pela associação de pelitos e carbonatos. De forma oposta, quando comparadas as colunas estratigráficas entre os Grupos Vazante e Paranoá, as diferenças são mais evidentes.

O Grupo Paranoá trata-se de uma sequência psamo-pelito-carbonatada (Campos *et al.*, 2013), na qual ocorre uma relativa dominância dos níveis arenosos. As incursões carbonáticas são registradas pela primeira vez apenas na forma de lentes de calcários intercaladas com metapelitos e quartzitos finos da Formação Ribeirão Piçarrão e por fim na formação de topo do grupo, denominada de Formação Córrego do Barreiro (Campos *et al.*, 2013). Outro aspecto estratigráfico distintivo de destaque decorre da ausência de registro glaciogênico em toda a coluna do Grupo Paranoá. A única ocorrência de rochas sedimentares rudáceas que poderia sugerir a participação de ambiente glacial na gênese de tal grupo é marcada pelo conglomerado basal São Miguel. No entanto, Braun (1968), Faria (1995) e Campos *et al.*, (2005) convergem para a interpretação ambiental de que a deposição dessa rocha foi condicionada por sistemas de leques aluviais associados a falhas de pequenos rejeitos vinculadas à subsidência precursora da bacia.

Em contraposição as considerações estratigráficas, os dados geocronológicos, baseados em proveniência de zircões detríticos, sugerem similaridade de idade máxima de deposição dos Grupos Vazante, Paranoá e Canastra e distanciam a idade máxima de deposição dos Grupos Vazante e Bambuí. A idade máxima de deposição estipulada para o Grupo Vazante, por Rodrigues *et al.*, (2008) mostra uma clara participação de áreas fontes mais antigas do que

aquelas responsáveis pelas fontes dos sedimentos do Grupo Bambuí. No caso do Grupo Bambuí, as idades apresentadas por Rodrigues *et al.*, (2008) mostram a predominância de zircões neoproterozoicos, com idades mais jovens que 0.62 Ga, que retratam uma proveniência marcante a partir da erosão das rochas da própria Faixa Brasília.

Quanto aos aspectos metalogenéticos, o Grupo Vazante se difere, tanto do Grupo Paranoá quanto, do Grupo Bambuí, por exceção dos depósitos fosfáticos da Formação Sete Lagoas. Como as características metalogenéticas estão geralmente atreladas à evolução da bacia e eventual atividade magmática, elas se tornam uma interessante ferramenta de fins comparativos.

O Grupo Vazante é reconhecido por hospedar grande quantidade de diferentes depósitos (ouro, zinco, chumbo, fosfato...) associados a uma única unidade estratigráfica da Faixa de Dobramentos Brasília enquanto, na outra vertente, no Grupo Paranoá são apenas registradas pequenas ocorrências de ouro ainda sem viabilidade de exploração econômica, assim como no Grupo Bambuí, onde as principais ocorrências minerais de valor econômico restringem-se aos dolomitos e fosforitos da Formação Sete Lagoas.

De forma análoga aos aspectos metalogenéticos, a sequência de evolução das bacias sugere diferentes ambientes genéticos entre os três conjuntos litoestratigráficos. As rochas encontradas no Grupo Vazante marcam a participação, tanto de sedimentação marinha de águas rasas, como de marinha de águas profundas. Distintamente dos Grupos Bambuí e Paranoá, nos quais a sedimentação se deu, em ambientes marinhos rasos até no máximo de plataforma aberta com eventos de tempestade. Tal afirmação é corroborada pelas interpretações de Castro (1997), Dardenne (2000) e Alkmim & Martins-Neto (2001) que consideram que a deposição do Grupo Bambuí ocorreu no contexto de uma bacia intracratônica rasa do tipo *foreland* e Pimentel *et al.*, (2011) e Campos *et al.*, (2013) que interpretam o Grupo Paranoá como porção proximal de uma sequência de margem passiva em condições marinhas plataformais epicontinentais.

Por fim, o último aspecto de comparação baseia-se na diferença entre os graus metamórficos superimpostos às rochas desses grupos. As fácies metamórficas nas quais os grupos se enquadram representam uma associação entre as profundidades crustais de soterramento de cada sequência e os eventos regionais de orogênese formadores da faixa móvel neoproterozoica.

O Grupo Bambuí apresenta muito baixo grau metamórfico, em razão de sua colocação crustal mais rasa, que segundo Alvarenga *et al.*, (2006) varia entre o anquimetamorfismo e a fácies xisto verde baixa. Em reflexo, essas rochas apresentam uma grande preservação de estruturas sedimentares primárias e raros minerais, identificados como metamórficos somente a partir de análises da cristalinidade em illitas realizadas por Bonhome (1976). No entanto, no contexto da zona externa da Faixa Brasília, considerada como a porção menos deformada do

orógeno, as rochas do Grupo Bambuí são caracterizadas como puramente sedimentares, tendo em vista que o metamorfismo nesse contexto é quase nulo. Assim como o Grupo Bambuí, o Grupo Vazante também apresenta baixo grau metamórfico, porém Rostirolla *et al.*, (2002) sugerem, a partir do arranjo estrutural e recristalização mineral, o enquadramento das rochas do Grupo Vazante como pertencentes a fácies xisto verde baixo, deformadas em porções crustais médias a superiores. Porém, novamente na zona externa, os efeitos metamórficos registrados nessas rochas são de menores intensidades e sugerem condições na zona do anquimetamorfismo.

As rochas do Grupo Paranoá, por outro lado, possuem maior caráter metamórfico quando comparadas aos outros dois conjuntos, o que reflete o soterramento da sequência em níveis crustais mais profundos. Na zona externa, as rochas do grupo apresentam características da fácies xisto verde baixo, mais especificamente na zona da clorita. Devido as maiores intensidades de metamorfismo, Campos *et al.*, (2013) e outros autores já se utilizam o prefixo “meta” para descrever as unidades litológicas deste grupo.

Após a comparação entre os critérios, pode-se inferir que o Grupo Vazante representa o preenchimento de uma bacia distinta, localizada entre o topo do Grupo Paranoá e base do Grupo Bambuí. Essa bacia, em decorrência das suas especificidades estratigráficas, possuía uma fisiografia complexa que permitiu o desenvolvimento simultâneo de ambientes marinhos rasos e profundos, além de taxas de subsidência elevadas que acarretaram na acumulação de uma espessa sequência sedimentar (Figura 5.2).

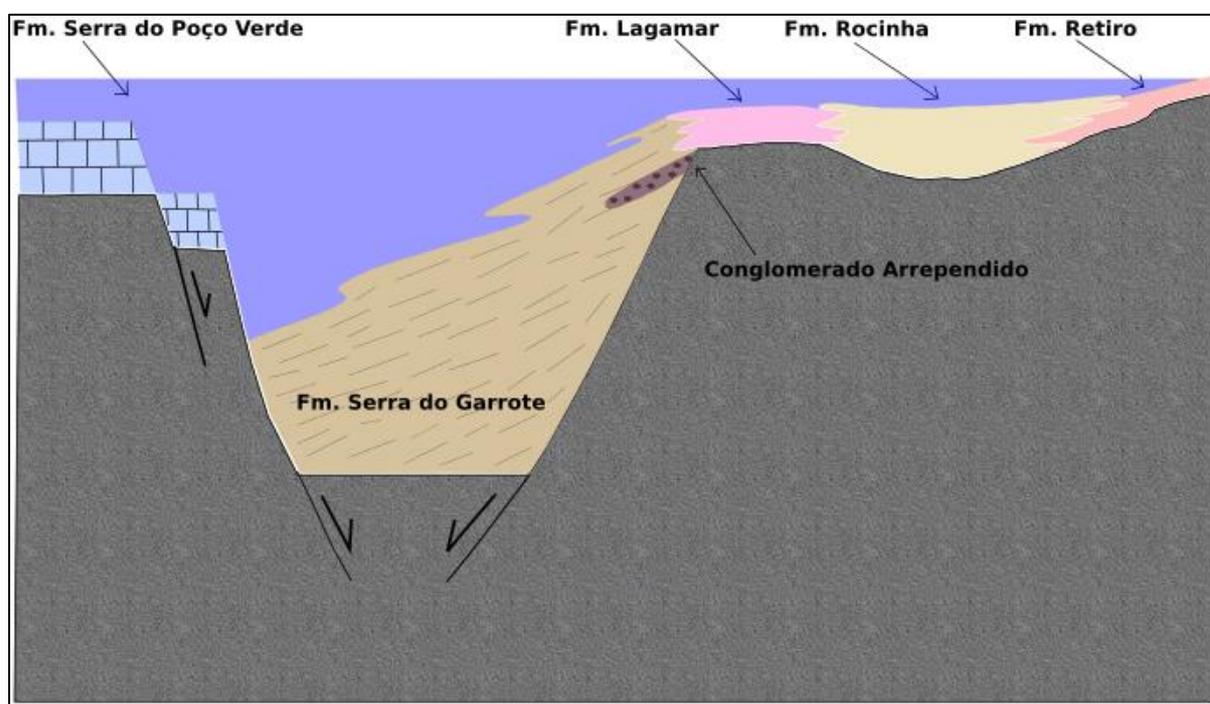


Figura 5.2 - Esquema simplificado representando a possível paleogeografia da bacia Vazante e a relação lateral entre as unidades. Detalhe para a Formação Serra do Poço Verde, na qual as taxas de subsidência contínuas permitiram a deposição de espessa sucessão carbonática de águas rasas.

A partir dessas características fisiográficas e deposicionais propostas, aliadas à cartografia regional de Bizzi *et al.*, (2004), amostras coletadas por Rodrigues *et al.*, (2008) e pontos da etapa de campo do presente trabalho, pode-se sugerir o zoneamento das formações do Grupo Vazante, como apresentado na Figura 5.3.

Na porção do fechamento sudeste da bacia, a Formação Retiro ocorre como uma faixa restrita que se articula com a Formação Rocinha através de contatos interdigitados. Após a deposição da Formação Rocinha, se estabelece um possível alto de embasamento, contínuo e de direção aproximada N-S, que possibilita a geração de um ambiente de águas mais rasas, propício a precipitação da primeira sequência carbonática da bacia, evidenciada pela Formação Lagamar.

A transição entre a Formação Lagamar e o restante da sequência carbonática das Formações Serra do Poço Verde, Morro do Calcário e Serra da Lapa é marcada pela presença das litologias, características de ambiente marinho profundo, da Formação Serra do Garrote que assinalam a provável localização do depocentro da bacia.

Enfim, toda a sequência pelito-carbonática de topo do grupo, da Formação Serra do Poço Verde até a Formação Serra da Lapa, foram depositadas em novo alto de embasamento na porção noroeste, que para permitir a constância das condições marinhas rasas e consequente precipitação dessa espessa sequência carbonática, deveria apresentar uma taxa de subsidência lenta e constante de forma a manter águas rasas em todo o período de deposição dos dolomitos (dolarenitos e doloruditos) ricos em estromatólitos.

Por fim, as diferenças entre os Grupos Canastra e Vazante são marcantes do ponto de vista litológico e estratigráfico-deposicional, em vista que a sucessão Canastra é composta por filitos e quartzitos com raras ocorrências de mármore na base, com forte contraste metamórfico com o Grupo Vazante. Já com relação aos ambientes deposicionais, no Grupo Canastra ocorrem ambientes marinhos variáveis desde plataforma interna a externa com episódios de ambientes restritos, dominados por tempestades e de inframaré. Com relação à proveniência e idade máxima de deposição, aparentemente houve interpretação equivocada em trabalhos anteriores. Rodrigues (2008) atribuiu a amostra codificada como ROC-1 como pertencente à Formação Rocinha do Grupo Vazante, entretanto em trabalho de campo realizado na mesma região foi possível verificar uma inconsistência na cartografia geológica, de forma que a rocha amostrada como associada à Formação Rocinha é, de fato, uma rocha da Formação Retiro com a intercalação de fácies rudáceas com diamictitos e arenitos arcoseanos finos. Essa observação permite explicar o diversificado padrão de proveniências mostrado no histograma, inclusive o pico relativo a idade mais jovem de 0.94 Ga, exclusivo a essa amostra, tendo em vista que a idade mais jovem obtida para as outras formações sobrepostas encontra-se na Serra da Lapa com 1.16 Ga.

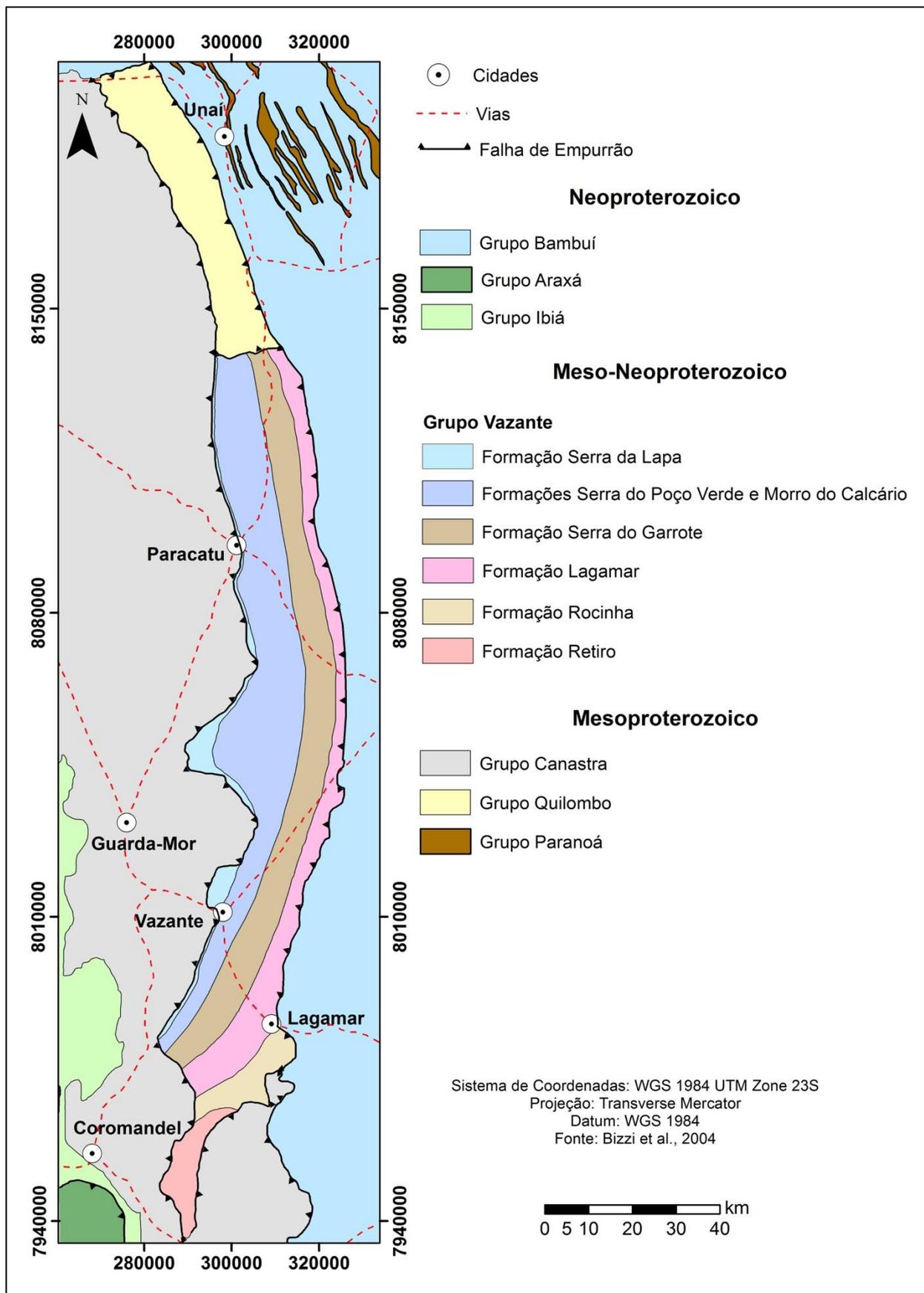


Figura 5.3 - Mapa geológico simplificado elaborado na escala de 1:1.000.000, modificado de Bizzi *et al.*, (2004), mostrando a variação cartográfica das unidades do Grupo Vazante. Nota-se também a inserção do Grupo Quilombo, unidade proposta por Moura (2018) e o refinamento dos grandes contatos do Grupo Canastra.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS DEPÓSITOS DE FOSFATO SEDIMENTAR DA FAIXA BRASÍLIA

Os depósitos da Faixa de Dobramentos Brasília exibem diferentes modelos metalogenéticos que resultam em características próprias de faciologia, mineralogia, concentrações de P_2O_5 e texturas de minério.

Nos depósitos do Grupo Bambuí, ocorrem grandes diferenças que refletem variações nos sistemas deposicionais das formações Sete Lagoas e Serra da Saudade. O modelo metalogenético do depósito da Formação Sete Lagoas apresenta maior produção de material fosfatado quando comparado ao da Formação Serra da Saudade, sendo que os principais depósitos fosfáticos da Formação Sete Lagoas são representados pelas lavras São Bento, Coité 1 e 2, Barra do Dia e Santiago localizadas entre os municípios de Arraias - TO e Campos Belos – GO.

Esses depósitos apresentam pequenos volumes de minério, que em associação podem resultar em grandes volumes de mineralização variável de baixo a alto teor de P_2O_5 (Monteiro 2009). As ocorrências da região podem ser divididas em quatro diferentes grupos que variam de acordo com as concentrações e estruturação das rochas. O grupo 1 é composto por fosforitos estratificados primários onde a concentração de P_2O_5 apresenta valores entre 24 e 32%. O grupo 2 é formado por siltitos fosfatados que apresentam teores variáveis entre 2 e 11% de P_2O_5 . No grupo 3 estão inseridos os fosforitos brechados que apresentam os maiores valores de concentração de P_2O_5 , que são da ordem de 34%. Por fim, o Grupo 4 abrange as ocorrências associadas a rochas saprolitizadas, como os fosforitos pedogênicos com 27% de P_2O_5 (Monteiro 2009).

A gênese do depósito é controlada por uma associação de fatores específicos. Segundo Monteiro (2009) a sedimentação fosfática ocorreu no contexto de bacia restrita com influência de ciclos transgressivos, sob condições climáticas frias, fato suportado pela presença próxima de rochas atribuídas à Formação Jequitáí e análises de $\sigma^{18}O$ e $\sigma^{13}C$, que foram combinados com a presença de paleo canais descontínuos no embasamento granítico da suíte Aurumina, gerando zonas na forma de cordões que propiciaram a maior deposição de fosfato (Figura 5.4). Após a sedimentação de fosforitos, se dá a sedimentação de siltitos fosfatados interdigitados, em seguida ocorreram deslizamentos nas bordas dos paleo canais com perfil encaixado, formando os fosforitos brechados e finalmente processos supergênicos resultaram na formação de níveis superficiais de fosforitos pedogênicos.

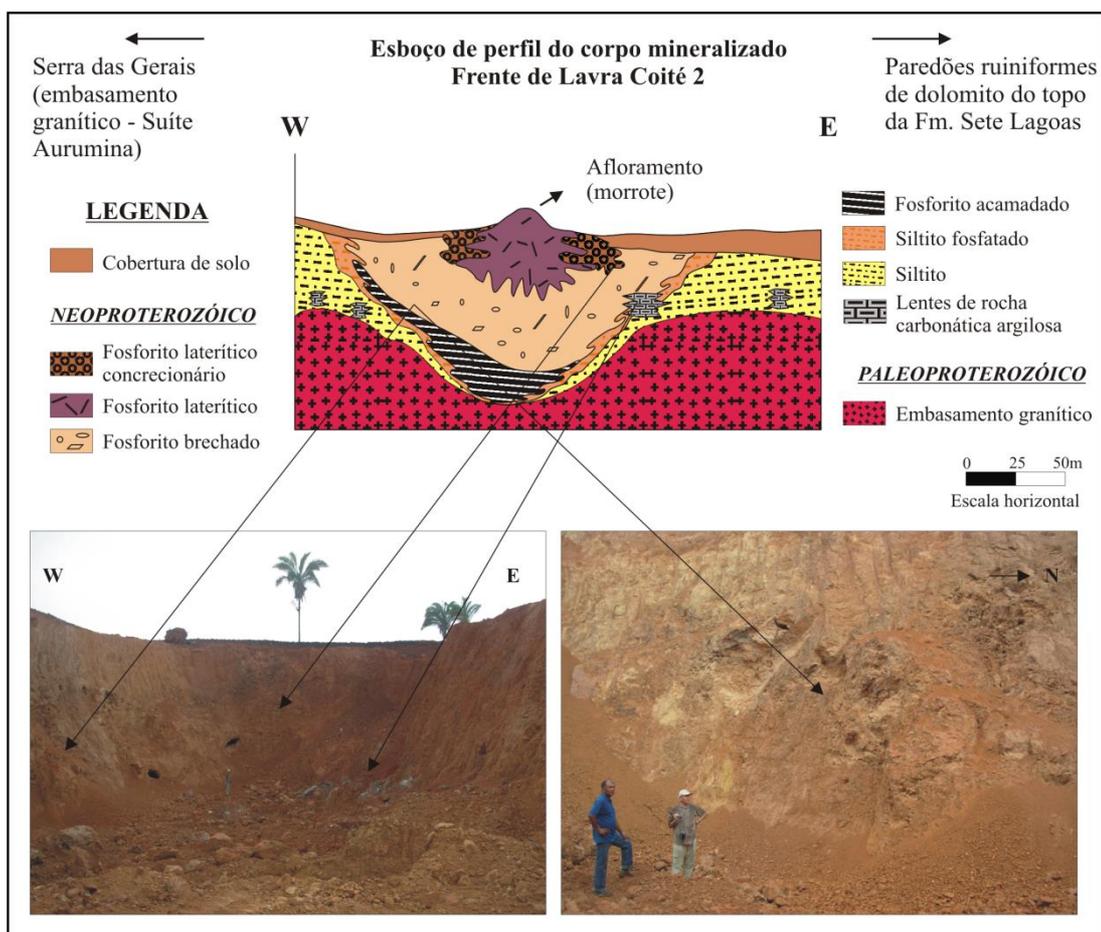
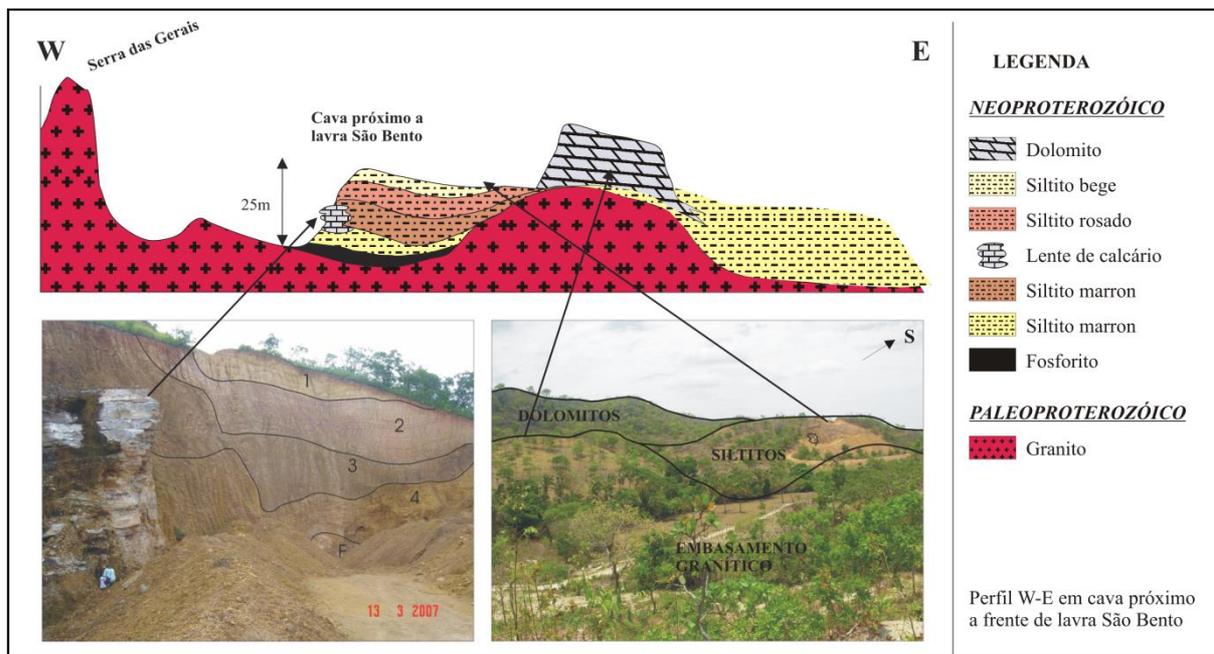


Figura 5.4 - Perfis esquemáticos retirados de Monteiro (2009) mostrando a forte correlação entre as diferentes fácies de rochas fosfatadas da Formação Sete Lagoas e os vales dos paleocanais do embasamento granítico.

Essas rochas afloram em morrotes de pequeno porte, na forma de matações silicificados disseminados pelo solo, apresentando variação tonais de bege até amarelo e são basicamente compostas por quartzo e fluorapatita. Petrograficamente, o material colofanítico ocorre disposto em laminações de fosfolutito puro com raros intraclastos fosfáticos e domínios de intercalações de fosfarenitos finos, com presença de lamelas de muscovita e grãos milimétricos de quartzo (Monteiro, 2009).

As rochas fosfáticas hospedadas na Formação Serra da Saudade, estão localizadas nas proximidades da cidade de Cedro do Abaeté - MG, e são representadas por ritmitos fosfáticos inseridos na porção superior desta unidade (Chaves *et al.*, 1971; Dardenne *et al.*, 1986; Lima *et al.*, 2007). O teor médio de P_2O_5 dessas rochas é de 8%, porém em locais com maior influência dos processos intempéricos, são formados veios preenchidos por wavellita de origem supergênica, onde as concentrações podem atingir valores superiores à 25% de P_2O_5 (Lima *et al.*, 2007).

A mineralização fosfática ocorre associada a lentes estratiformes e descontínuas de ritmitos areno-pelíticos acinzentados, concordantes com o acamamento dobrado e intercalados por sequências de ritmitos areno-pelíticos verdes, denominadas verdetes (Lima *et al.*, 2007). Segundo Lima *et al.*, (2007), a sedimentação fosfática pode ser dividida em 4 fases que sumarizam a evolução geológica do depósito. A fase 1 corresponde a formação primária de francolita em ambiente de águas rasas e baixa energia, com influxos de material detrítico fino e pouca participação carbonática. Na fase 2 ocorre o retrabalhamento e erosão do ambiente gerado na fase 1 por episódios de tempestades e ação de ondas, formando os depósitos alóctones do ritmito fosfático. A fase 3 é marcada pelo surgimento de fluorapatita em estágio de evolução diagenética, a partir da alteração da francolita primária. Por fim, a fase 4 tem características puramente epigenéticas, com a formação de wavellitas supergênicas.

Petrograficamente, os níveis fosfatados de Cedro do Abaeté apresentam fluorapatita como principal mineral fosfatado, além de grãos detríticos de apatita de granulometria areia fina e cimento fosfático diagenético, preferencialmente em zonas de charneira de dobras, onde o minério remobilizado é mais facilmente concentrado.

Diferentemente do Grupo Bambuí, no Grupo Vazante, os depósitos de Rocinha e de Lagamar são atribuídos a um modelo metalogenético comum, gerando assembleias minerais fosfatadas mais ricas e fácies de minérios mais complexas. As diferenças observadas em relação a concentração de P_2O_5 , mineralogia e textura do minério dentro da própria Formação Rocinha, refletem apenas mudanças morfológicas da bacia deposicional, que varia lateralmente em profundidade, desde ambientes com influência de base de ondas até condições mais protegidas

com maior lâmina de água. Neste caso se considera que a bacia se aprofunda a partir da região de Rocinha em direção a cidade de Lagamar.

Os depósitos de Rocinha e Lagamar estão localizados no estado de Minas Gerais e hospedam-se nas rochas da Formação Rocinha, parte basal do Grupo Vazante. O depósito de Rocinha, composto predominantemente por fosfarenitos, foi inicialmente cubado com uma reserva aproximada de 415 Mt com teores variando de 10 a 15% de P_2O_5 , o que lhe confere o título de maior volume de fosfato brasileiro (Dardenne & Schobbenhaus, 2003). Por outro lado, o depósito de Lagamar, que se situa ao norte dentro da mesma Formação Rocinha, é composto basicamente por fosfolutitos e atinge volume aproximado de 5 Mt com teores variando de 30 a 35% de P_2O_5 (Dardenne & Schobbenhaus, 2003).

O fosfato do depósito de Rocinha ocorre na forma de corpos bandados amarronzados de espessura variável intercamadados por folhelhos pobremente fosfatados, onde Chaves *et al.*, (1976) interpretam a fosfogênese como o resultado de enriquecimento secundário de fósforo a partir do intemperismo de folhelhos negros com baixos teores de P_2O_5 . Duas diferentes texturas são identificadas associadas ao minério. A primeira é dominada pela presença de fosfarenitos, localmente derivados de retrabalhamento de tapetes algais e uma segunda caracterizada pela presença de fosfolutitos homogêneos finos.

No depósito de Lagamar, os fosforitos ocorrem na forma de níveis contínuos inseridos em sequência metarrítmica. Nogueira (1993) classificou os fosforitos do depósito em dois diferentes grupos petrográficos: fosforitos puros e o dos fosforitos calcíticos. O primeiro grupo é constituído por fosfolutitos, basicamente compostos por apatita criptocristalina e por fosfarenitos micríticos de granulometria variando de areia grossa a fina, com raros fosfointraclastos. Os fosforitos calcíticos ocorrem como níveis intercalados à sequência fosfática e podem ser divididos em fosfolutitos e fosforitos calcimicríticos. Os fosfolutitos são constituídos por massa fosfomicrítica onde estão disseminados cristais anédricos de calcita intersticial, ao contrário dos fosforitos calcimicríticos, que são compostos por grãos fosfáticos imersos em meio de calcita microcristalina.

A sedimentação fosfática de ambos os depósitos teve início com a deposição de lama colofanítica com alguma mistura de lama calcimicrítica na borda de uma plataforma continental, na transição entre condições de águas rasas oxidantes e águas mais profundas redutoras. Tais condições encaixam perfeitamente os depósitos no modelo proposto por Kazakov (1937), sendo que a Formação Serra do Garrote representaria a porção mais profunda da bacia e local de onde foram originadas as correntes ascendentes em direção a plataforma continental, caracterizada pela associação de fácies marinhas rasas (Figura 5.5).

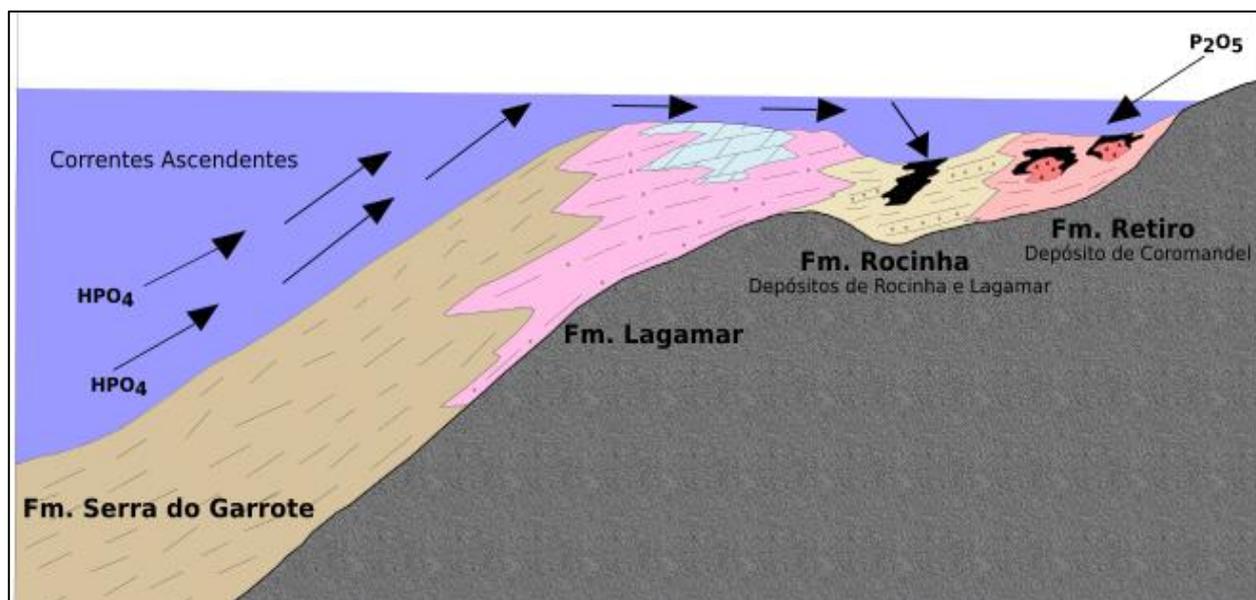


Figura 5.5 - Modelo fosfogenético proposto para os depósitos do Grupo Vazante. A deposição dos fosfatos da Formação Retiro se dá em possível ambiente marinho raso alimentado por fósforo de fontes continentais, com influência direta da glaciação na geração das condições ambientais necessárias para a precipitação dos fosfatos. Ao contrário, os depósitos associados à Formação Rocinha têm origem do fósforo a partir de complexos de fosfatos dissolvidos em águas profundas com deposição em condições marinhas lagunares sob lâmina d'água e condições físico-químicas específicas.

Em contrapartida à Formação Rocinha, o depósito da Formação Retiro apresenta características genéticas mais próximas aos depósitos da Formação Sete Lagoas. As ocorrências são caracterizadas por menores volumes de rochas fosfatadas com altos valores de concentração de P_2O_5 interdigitados com siltitos fosfatados que compõem o maior volume de minério de baixo teor. Em termos metalogenéticos, ambos os depósitos apresentam uma forte relação com eventos glaciais e similaridades entre a variedade faciológica da Unidade Fosfatada. No entanto, as assembleias minerais encontradas, a paleogeografia das bacias e a associação com as rochas encaixantes permitem a separação dos modelos metalogenéticos dos depósitos.

A partir dos difratogramas de Raios-X das análises realizadas por Monteiro (2009), as rochas fosfatadas vinculadas à Formação Sete Lagoas mostram assembleias mineralógicas mais simplificadas, compostas basicamente por quartzo e fluorapatita, com presença subordinada de caulinita na fácies dos fosforitos pedogênicos e illita nos siltitos fosfatados. Em alternativa, a assembleia mineralógica da Unidade Fosfatada da Formação Retiro é mais complexa, com maior participação de minerais detríticos e presença de minerais fosfáticos tardios, como wavellita.

Assim como a variação mineralógica, a relação geomorfológica e o vínculo com as rochas encaixantes dos depósitos da Formação Sete Lagoas assumem a função de ferramentas distintas de destaque. Monteiro (2009) aponta que as rochas fosfatadas da base do Grupo Bambuí ocorrem intercaladas a siltitos e inerentemente associadas à vales formados por paleocanais descontínuos encaixados no embasamento granítico da Suíte Aurumina ou

sobrepostas aos arcóseos do Grupo Araí, enquanto nos altos de embasamento foram depositados calcários e dolomitos da Formação Sete Lagoas. No caso da Formação Retiro, essa correlação entre as ocorrências e a geomorfologia se dá de forma mais discreta, além da intrínseca relação das rochas fosfatadas com a Unidade Rudácea, sem evidências de associação com o embasamento ou carbonatos, os quais não são identificados na área de estudo.

Portanto, o depósito de Coromandel possui características genéticas específicas que não permitem o seu enquadramento geológico em nenhum dos modelos fosfogenéticos da Faixa Brasília, e que possibilita a sugestão do modelo metalogenético do “Tipo Coromandel” como o principal formador das rochas fosfatadas.

As principais peculiaridades desse modelo seriam a forte associação dos siltitos fosfatados e fosforitos com rochas rudáceas, que marcam a influência da glaciação como uma importante condição na formação desses depósitos, a ínfima participação carbonática nos ambientes deposicionais, além da precipitação fosfática estar condicionada a um ambiente lagunar preservado e abastecido em P_2O_5 a partir da lixiviação de fontes continentais, como mostrado na Figura 5.5.

Essas principais diferenças entre os depósitos citados podem ser sumarizadas conforme a Tabela 5.2.

Depósito	P_2O_5 (%)	Minerais Fosfáticos	Textura do Minério	Paleoambiente	Mecanismo de Fosfogênese
Tipo Campos Belos/Arraias (Fm. Sete Lagoas)	De 2 a 32	Fluorapatita	Fosfolutitos laminados intercalados por finos fosfarenitos e abundantes fosforitos brechados	Bacia restrita de baixa energia com influência de ciclos transgressivos em regime climático frio e presença de paleo canais no embasamento	Evento de deglaciação em bacia restrita com forte controle paleo-geográfico
Tipo Cedro do Abaeté (Fm. Serra da Saudade)	De 8 a 25	Carbonato - Fluorapatita Wavellita	Fosfolutito laminado com fosfointraclastos de granulometria areia fina	Bacia restrita de baixa energia com influência de ciclos transgressivos e retrabalhamento por ondas de tempestade	Formação de francolitas primárias e epigênese com formação de carbonato-fluorapatita diagenética
Tipo Lagamar (Fm. Rocinha)	De 30 a 35	Carbonato - Fluorapatita Wavellita	Fosfolutitos e fosfarenitos de granulometria areia grossa com raros intraclastos, intercalados com fosfolutitos calcíticos	Borda de plataforma continental entre a transição das zonas redutora e oxidante com influência de correntes marinhas ascendentes	Teoria da Ressurgência Costeira
Tipo Rocinha	De 10 a 15	Carbonato - Fluorapatita Wavellita	Fosfolutitos puros homogêneos intercalados por fosfarenitos retrabalhados		
Tipo Coromandel (Fm. Retiro)	De 2 a 34	Fluorapatita Wavellita	Fosfolutitos laminados intercalados por fosfarenitos ricos em fosfointraclastos e raros fosforitos brechados	Contexto lagunar em ambiente marinho raso, fortemente controlado por glaciação e abastecido em fósforo lixiviado de fontes continentais	Precipitação direta de fluorapatita a partir de condições ambientais controladas por geleira

Tabela 5.2 - Principais aspectos comparativos entre os depósitos de fosfato sedimentar da Faixa Brasília.

5.4 VETORES EXPLORATÓRIOS

Conforme todas as características descritas no tópico anterior, o depósito do tipo Coromandel apresenta uma série de vetores exploratórios que identificam a mineralização e auxiliam na determinação das áreas de ocorrência das rochas fosfatadas dentro da área de estudo.

Como já citado diversas vezes ao longo do trabalho, o principal vetor de controle da ocorrência das rochas fosfatadas são as litologias referentes a Unidade Rudácea glaciogênica. Os fosforitos e siltitos fosfatados sempre ocorrem em contato direto, sobrepostos ou nas proximidades imediatas dos corpos de diamictitos e arenitos conglomeráticos, de forma que, a identificação dessas litologias durante os trabalhos de campo atenta para a necessidade de investigação de suas adjacências.

A presença de cristas alinhadas ou morros com intensa quantidade de blocos de silexitos também sugere proximidade das ocorrências, tendo em vista que possivelmente essas rochas são derivadas da completa silicificação de antigos fosforitos. Outra relação existente, porém não muito bem discriminada entre esses tipos litológicos deriva do fato de que as ocorrências de rochas fosfatadas mais expressivas em volume ocorrerem sempre na porção à leste das serras de silexitos. Assim como os silexitos, a presença de siltitos laminados amarelados também aponta para a presença de rochas fosfatadas, tendo em vista que essas litologias foram interpretadas como produto da total lixiviação do P_2O_5 , o que é corroborado pela ausência de reação ao molibdato de amônia, e pelo fato de que estas rochas ocorrerem vinculadas às porções mais superficiais dos afloramentos da Unidade Fosfatada.

Por mais que a correlação entre o depósito de Coromandel e a geomorfologia aconteça de forma discreta, é possível notar que as rochas fosfatadas tendem a formar relevos de morrotes e morros de vertentes suavizadas alinhados e arredondados. Essas formas de relevo são favorecidas em razão da alta susceptibilidade pedogenética dessas rochas, o que também ocasiona a formação de espessas coberturas de solos férteis densamente vegetados.

A última característica marcante dos depósitos de fosfato de origem sedimentar é sua fácil associação com elementos traços como selênio, molibdênio, zinco, cobre, cromo, tório, elementos terras raras e em especial o urânio. A correlação do urânio com os fosfatos se dá pela substituição do elemento P pelo U no sítio do ânion, principalmente nos depósitos de origem sedimentar. Os valores médios da concentração de U em fosforitos variam de 50 a 200 ppm sendo que nas fácies mais ricas em matéria orgânica, esses valores podem atingir até 3000 ppm (Jarvis *et al.*, 1994). Por outro lado, a presença de tório nessas rochas é mais discreta, porém valores de 0,5 a 8,6 ppm foram relatados por Monteiro (2009) em fosforitos e rochas fosfatadas sedimentares da base do Grupo Bambuí.

Essa assinatura gamaespectrométrica é bastante evidente no depósito de Coromandel, sendo que as áreas de ocorrência apresentam elevadas respostas de U e Th. Sendo assim, a gamaespectrometria aérea se torna uma importante ferramenta prospectiva, que quando aliada ao modelo digital de elevação (MDE), pode ser manipulada por técnicas de sensoriamento remoto e resultar em um robusto guia exploratório, como mostrado no Apêndice 3.

É importante ressaltar que a correlação de gamaespectrometria com zonas mineralizadas não ocorre nos depósitos da Formação Sete Lagoas (em Arraias e Campos Belos). Esta correlação foi testada utilizando-se imagens de geofísica aérea e equipamentos portáteis de campo. Em ambos os casos, a correlação não apresentou sucesso, sendo que esta conexão não pode ser aplicada como ferramenta prospectiva para os fosfatos da base do Grupo Bambuí, mas é muito útil para os depósitos contidos no Grupo Vazante.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir das observações, em especial as realizadas durante as campanhas de campo, como a inexpressiva presença de carbonatos, a característica glaciomarinha dominante da Unidade Rudácea, a significativa participação psamítica e grau metamórfico pouco mais elevado, foi possível concluir que as rochas aflorantes na área de estudo são indubitavelmente pertencentes ao Grupo Vazante e mais especificamente à Formação Retiro. Essa unidade é basicamente composta por 3 associações de fácies que compreendem as Unidades Rudácea, Fosfatada e Pelítica que representam todos os episódios de sedimentação da base do grupo. Esses episódios iniciam-se a partir da instalação de um ambiente pró-glacial que evolui para uma planície de *outwash* e que se encerra com o retrabalhamento em plataforma marinha rasa e incursões de ciclos transgressivos posteriores.

Assim conclui-se, ao contrário de outros trabalhos desenvolvidos na região, que as rochas que contêm fosforitos e siltitos fosfatados são atribuídas à Formação Retiro do Grupo Vazante e não às Formações Carrancas, Sete Lagoas ou Serra de Santa Helena do Grupo Bambuí.

Em função da intrínseca correlação estratigráfica existente entre a Unidade Rudácea e a Unidade Fosfatada, conclui-se que o acúmulo de fosfato da Formação Retiro é diretamente controlado pelas condições ambientais de alcalinidade e oxirredução geradas pela presença da geleira, juntamente com o grande aporte de P_2O_5 lixiviado de fontes continentais e restritas taxas de atividade biológica metabolizadora de fósforo, estabelecidas pela baixa temperatura das águas oriundas de degelo.

A Unidade Fosfatada é marcada principalmente pela presença das fácies silito fosfatado, fosforito laminado e fosforito brechado, nas quais as diferenças do teor de P_2O_5 , estruturas e texturas sedimentares e distribuição de ocorrências pela área de estudo são resultado das variações de energia de fluxo, aporte de sedimentos siliciclásticos e intensificação das condições propícias a precipitação de fosfato dentro dos ambientes de deposição da Formação Retiro.

Os teores de P_2O_5 (de 2 a 34%), a similaridade entre as fácies e o contexto geológico da Unidade Fosfatada, aproximam a gênese dos depósitos das Formações Retiro e Sete Lagoas. No entanto, a maior complexidade das assembleias mineralógicas, o discreto controle paleogeográfico e as diferenças morfológicas entre as bacias dos dois grupos não permitem o enquadramento do depósito da Formação Retiro no mesmo modelo metalogenético da Formação Sete Lagoas. Sendo assim, é possível propor um modelo de metalogênese do “tipo Coromandel” que engloba todas as características observadas, para o depósito da Formação Retiro.

Devido às características marcantes do depósito tipo Coromandel, é possível ainda estabelecer uma série de importantes vetores exploratórios que indicam as áreas com maior favorabilidade de se encontrar rochas fosfatadas na área de estudo. A presença das rochas da Unidade Rudácea se torna o principal vetor de exploração, seguida da ocorrência de pelitos laminados amarelados e silixitos, além da forte associação das rochas fosfáticas com o urânio e tório que resultam em boas respostas aos dados de gamaespectrometria.

Os procedimentos adotados para se alcançar os objetivos propostos foram bem sucedidos, de tal forma, que não só resultaram em uma nova perspectiva para o depósito de Coromandel como também acrescentaram novas informações acerca da cartografia do Grupo Vazante, em especial na porção sul de fechamento da Faixa Vazante. No entanto, algumas questões permanecem em aberto e demandam maior quantidade de estudos para a crescente evolução do conhecimento, tanto do depósito de Coromandel, quanto da geologia do Grupo Vazante. Sendo assim, recomenda-se que mais alguns pontos específicos sejam explorados em trabalhos futuros, incluindo:

- Realização de análises de geoquímica fina nas rochas fosfatadas da Formação Retiro para se propor um modelo metalogenético mais robusto, e em especial dos elementos menores e terras raras, a fim de se ter uma ferramenta de comparação precisa e que auxilie na distinção ou similaridade entre os depósitos de fosfato da Faixa Brasília, principalmente entre o depósito do tipo Coromandel e o do tipo Arraias/ Campos Belos;
- Realização de análises isotópicas voltadas a proveniência de sedimentos que também é ponto chave, para que se possa ter uma estimativa da idade da glaciação da base do Grupo Vazante e sua posição cronoestratigráfica;
- Por fim, sugere-se a cartografia detalhada da porção sul do Grupo Vazante, para o melhor entendimento da articulação com o Grupo Canastra e da porção norte, onde os contatos com o Grupo Quilombo permanecem indefinidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F.; Martins-Neto, M.A. (2012). **Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco carton, eastern Brazil**. *Marine and Petroleum Geology*, 33:127-139.
- Alvarenga C.J.S.; Dardenne M.A.; Botelho N.F.; Machado M.A.; Lima O.N.B.; Almeida T; (2006). **Relatório Final das Folhas SD.23-V-C-III - Monte Alegre de Goiás; SD.23-V-C-V - Cavalcante; SD.23-V-C-VI – Nova Roma**. Convênio UnB/FINATEC/CPRM. Brasília, 67p.
- Azmy, K.; Kendall, B.; Creaser, R.A.; Heaman, L.E.; Oliveira, T.F. (2008). **Global correlation of the Vazante Group, São Francisco Basin, Brazil: Re-Os and U-Pb radiometric age constraints**. *Precambrian Research* 164:160-172.
- Azmy, K.; Veizer, J.; Misi, A.; Oliveira, T.F. de; Sanches, A.L.; Dardenne, M.A. (2001). **Dolomitization and isotope stratigraphy of the Vazante Formation, São Francisco Basin, Brasil**. *Precambrian Research*, 112:303-329.
- Babinski, M. (2011). **Geocronologia das glaciações criogenianas do Brasil central**. Diss. Universidade de São Paulo.
- Babinski, M.; Monteiro, L.V.S.; Fetter, A.H.; Bettencourt, J.S., & Oliveira, T.F. (2005). **Isotope geochemistry of the mafic dikes from the Vazante non-sulfide zinc deposit, Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(3-4):293-304.
- Barbosa, O. (1955). **Guia de excursões**. In: CONGR. BRAS. GEOL., 9. Araxá. *Noticiário*, 3: 3-5. SBG, São Paulo.
- Barbosa, O.; Braun, O.P.G.; Dyer, R.C.; Cunha, C. A. B. R. (1970). **Geologia da região do Triângulo Mineiro (Projeto Chaminés)**. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 49: 2409-2422.
- Bizzi, L.A.; Schobbenhaus, C. Gonçalves, J.H.; Baars, F.J.; Delgado, I.M.; Abram, M.B.; Leão Neto, R.; Matos, G.M.M.; Santos, J.O.S. (2001). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas - SIG e Mapas na Escala 1:2.500.000**. Brasília: CPRM, 2001.
- Bonhomme, M.G. (1976). **Mineralogie des fractions fines et datations rubidium-strontium dans le Groupe Bambuí, Minas Gerais, Brésil**. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo. 6(4):211-222.
- Boulton, G.S.; Deynoux, M. (1981). **Sedimentation in glacial environments and the identification of tills and tillites in ancient sedimentary sequences**. *Precambrian Research*, 15:397-422.
- Braun, O.P.G. (1968). **Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí**. In: Congr. Bras. Geol.22. Anais ... Brasília/SBG. p.165-166.
- Campos Neto, M.C. (1984). **Litostratigrafia e evolução paleogeográfica dos Grupos Canastra e Paranoá (Região Vazante-Lagamar, MG)**. *Revista Brasileira de Geociências*, 14(2):81-91.
- Campos, J.E.G.; Dardenne, M.A.; Freitas-Silva, F.H.; Martins-Ferreira, M.A.C. (2013). **Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília**. *Brazilian Journal of Geology*, 43(3):461-476.
- Castro, P.T.A. (1997). **Os Conglomerados Associados ao Grupo Bambuí na Porção Sudoeste do Cráton do São Francisco: Sedimentologia, Estratigrafia e Implicações Tectônicas**. Universidade de Brasília, Tese de Doutor, 255p.

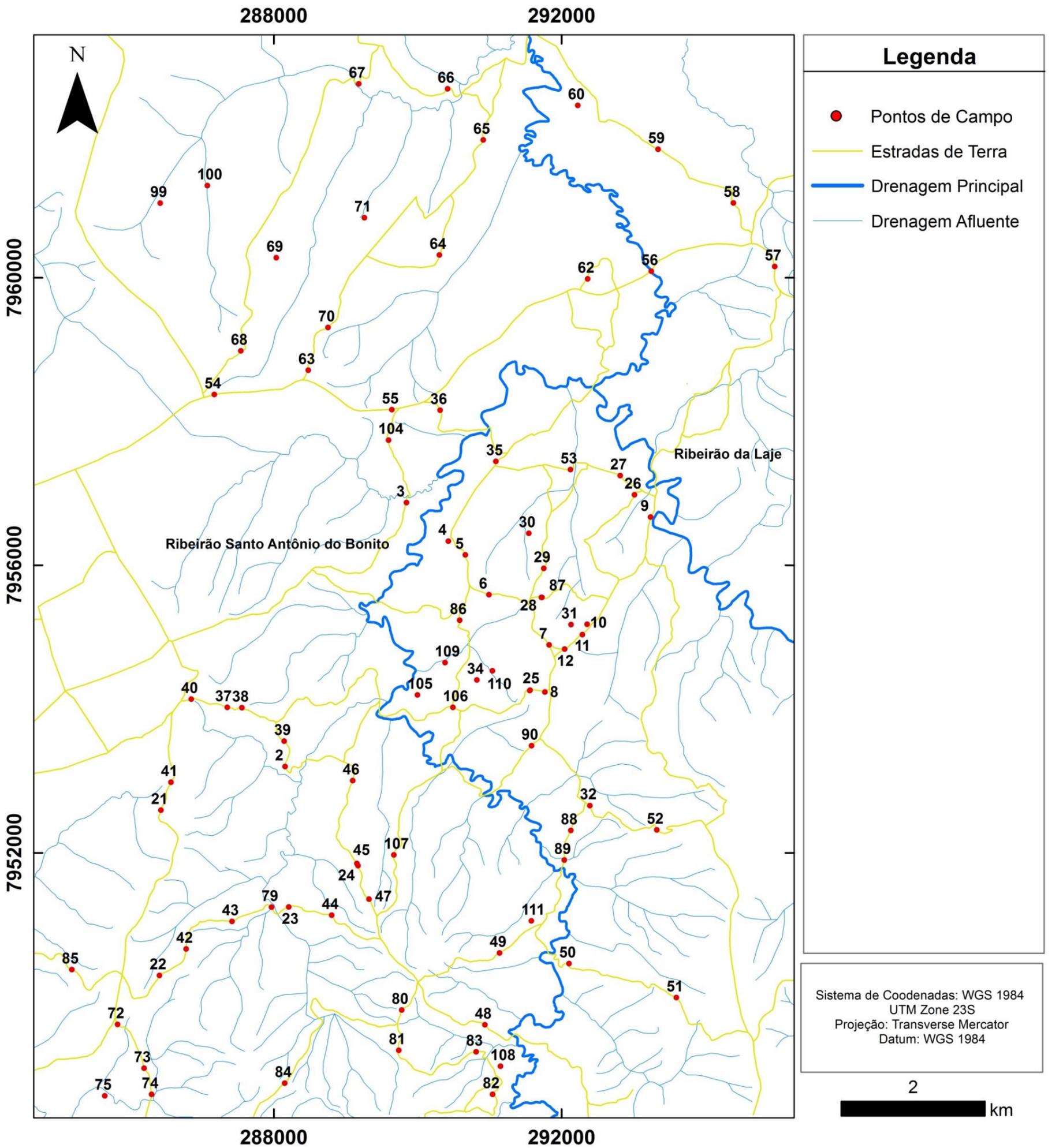
- Chaves A.G.; Heineck C.A. & Tavares W.P. (1971). **Projeto Cedro do Abaeté**. Belo Horizonte. Convênio DNPM/ CPRM 1971, 2v. (Rel. Final).
- Chaves A.G.; Heineck C.A.; Tavares W.P. (1976). **Projeto Patos de Minas**. Relatório Final de Pesquisa, CPRM, Belo Horizonte, 78p.
- Chaves, M.L.D.S.C.; Guimarães, J.T.; Andrade, K.W. (2010). **Litofácies glaciomarinhas na Formação Jequitaí: possíveis implicações na redistribuição de diamantes a oeste da Serra do Espinhaço (MG)**. Revista Brasileira de Geociências, 40(4), 516-526
- Cloud, P.; Dardenne, M. (1973). **Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil**. Geological Society of America Bulletin, 84(5):1673-1676.
- Cook P.J.; Shergold J.H. (1984). **Phosphorus, phosphorites and skeletal evolution at the Precambrian- Cambrian boundary**. Nature, 308:231-6.
- Cook, P.J.; Shergold, J.H. (1986). **Proterozoic and Cambrian phosphorites: nature and origin**, in Cook, P.J. and Shergold, J.H., eds., Phosphate Deposits of the World. Proterozoic and Cambrian Phosphorites: Cambridge, Cambridge University Press, p. 369-386.
- Cook P.J. (1992). **Phosphogenesis around the Proterozoic-Phanerozoic transition**. Journal of the Geological Society, 149: p. 615-620.
- Costa, M.T.; Branco, J.J.R. 1961. **Roteiro de Excursão Belo Horizonte-Brasília**. In: XIV Congresso Brasileiro de Geologia, V. 15:9-25. Belo Horizonte.
- Dardenne, M.A. (1978). **Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central**. In Congresso Brasileiro de Geologia 30:597-610.
- Dardenne, M.A. (1981). **Os grupos Paranoá e Bambuí na faixa dobrada Brasília**. SBG, Simp. Cráton São Francisco, 1, 104-157.
- Dardenne, M.A.; Trompette, R.; Magalhaes, L.F. & Soares, L.A. (1986). **Proterozoic and Cambrian phosphorites - regional review: Brazil**. Phosphate deposits of the world, 1, 116-132.
- Dardenne, M.A.; Freitas-Silva, F.H.; Nogueira, G.S.M. & Souza, J.C.F. (1997). **Depósitos de fosfato de Rocinha e Lagamar, Minas Gerais**. Schobbenhaus, C.; Queiroz, ET; Coelho, CES (coord.), 113-122.
- Dardenne, M.A.; Freitas-Silva, F.H.; Souza, J.D., & Campos, J.E.G. (1998). **Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília**. In Congresso Brasileiro Geologia (Vol. 40, p. 26). Resumos, SBG Belo Horizonte.
- Dardenne, M.A. (2000). **The Brasília fold belt**. Tectonic Evolution of South America, 1:231-263.
- Dardenne, M.A.; Schobbenhaus C. (2003). **Depósitos Minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogenéticas**. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (Eds). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil - Texto, mapas e SIG. Brasília, CPRM, p. 365-448.
- Dias P.H.A. (2011). **Estratigrafia e Tectônica da Faixa Brasília na Região de Ibiá, Minas Gerais: Estudo de Proveniência Sedimentar dos grupos Canastra e Ibiá, com base em estudos isotópicos U - Pb e Sm - Nd**. Dissertação de Mestrado, IGC/U FMG.
- Donnelly T.H.; Shergold J.H.; Southgate P.N.; Barnes C.J. (1990). **Events leading to global phosphogenesis around the Proterozoic/Cambrian boundary**. Geological Society, London, Special Publications, 52:273-287.
- Féboli, W.L.; Ribeiro, J.H. (2013). **Carta geológica: folha Patos de Minas-SE. 23-YA-VI. Carta geológica - escala de 1:100.000**.

- Fonseca, D.S.; Silva, T. (2014). **Sumário mineral brasileiro: fosfato**. Brasília: DNPM.
- Freitas-Silva, F.H.; Dardenne, M.A. (1994). **Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o Grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás**. *Simp. Geol. Centro Oeste*, 4, 164-165.
- Freitas-Silva, F.H.; Dardenne, M.A. (1997). **Pb/Pb isotopic patterns of galenas from Morro do Ouro (Paracatu Formation), Morro Agudo/Vazante (Vazante Formation) and Bambuí Group deposits**. In *South American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts* (pp. 118-120).
- Fuck, R.A.; Pimentel, M.M.; Silva, L.J.H.D. (1994). **Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins**. In *SBG, Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 38, No. 1, pp. 215-216).
- Geboy, N.J. (2006). **Rhenium-Osmium age determinations of glaciogenic shales, Vazante Formation, Brazil**. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Maryland, College Park. Geology 226:9-21.
- Geboy, N.J., Kaufman, A.J., Walker, R.J., Misi, A., de Oliviera, T.F., Miller, K.E., & Poulton, S.W. (2013). **Re-Os age constraints and new observations of Proterozoic glacial deposits in the Vazante Group, Brazil**. *Precambrian Research*, 238, 199-213.
- Rodrigues, J.B.; M.M, Pimentel; Buhn, B; Dardenne, M.A; Alvarenga, C.J.S. (2008). **Provenance of the Vazante group** - San Carlos de Bariloche. Abstracts, INGEIS-CONICET VI South American Symposium on Isotope Geology, pp. 29-31
- Kazakov A.V. (1937). **The phosphate facies: origin of the phosphorite and the geologic factors of formation of the deposits**. *Proc. Sci. Inst. Fertilizers and Insectofungicides*, 145:1-106
- Karfunkel J.; Hoppe A. (1988). **Late Proterozoic glaciation in central-eastern Brazil: synthesis and model**. *Palaeo- geo., Palaeoclim., Palaeoeco.*, 65: 1-21
- Kirschvink, J.L. (1992). **Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the snow- ball earth**. In: *The Proterozoic Biosphere* (J. W. Schopf and C. Klein, eds), pp.51–52. CambridgeUniversityPress, Cambridge.
- Lima O.N.B.; Uhlein A.; Britto W. (2007). **Estratigrafa do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais**. *Revista Brasileira de Geociências*, 37: 204-215.
- Madalosso, A.; Valle, C.R.O. (1978). **Considerações sobre a estratigrafia e sedimentologia do Grupo Bambuí na região de Paracatu-Morro Agudo (MG)**. In: *Congresso Brasileiro de Geologia* 30, pp.622-631.
- Madalosso, A. (1980). **Considerações sobre a paleogeografia do Grupo Bambuí na região de Paracatu - Morro Agudo (MG)**. In: *31 Congresso Brasileiro de Geologia, Anais... (2):772-785*.
- Marques, C.S.S.; Uhlein, A.; Oliveira, G.D.; Uhlein, G.J.; Sial, A.N.; Alvarenga, C.J.S. (2015). **Geologia e quimioestratigrafia isotópica do Grupo Vazante em Lagamar (MG)**. *Revista Geonomos*, 23(1).
- Marini, O.J.; Fuck, R.A.; Danni, J.C.; Dardenne, M.A. (1981). **A evolução geotectônica da Faixa Brasília e do seu embasamento**. *Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais*, 1(1981), 100-113.

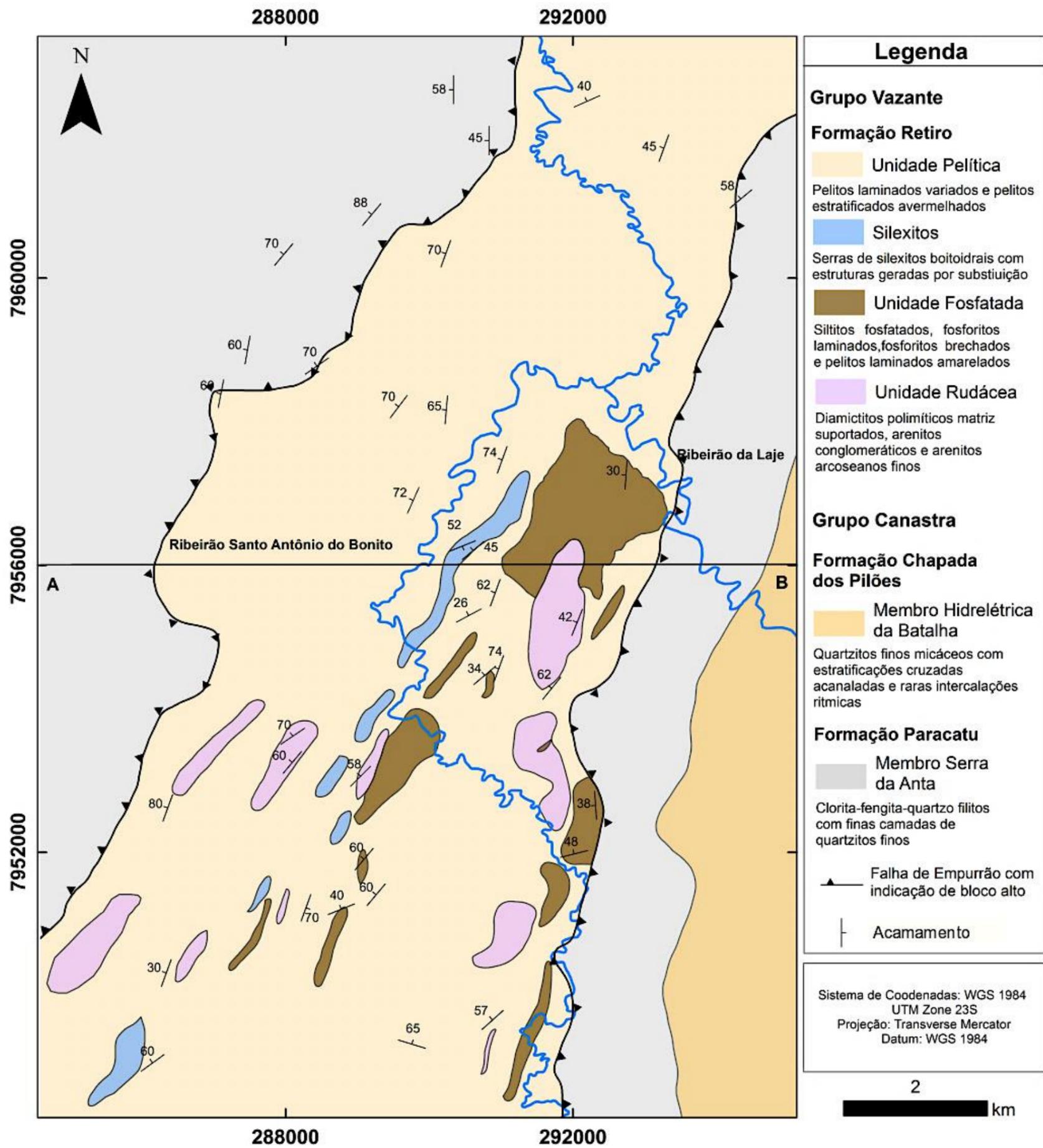
- Martins-Ferreira, M.A.C.; Campos, J.E.G.; Alvarenga, C.J.S. (2013). **A Formação Jequitai na região de Vila Boa, GO: exemplo de sedimentação por geleiras terminais no Neoproterozoico.** *Brazilian Journal of Geology*, 43(2):373-384.
- Misi, A.; Azmy, K.; Kaufman A.J.; Oliveira, T.F.; Sanches, A.L. (2010a). **Metallogenic and phosphogenic events in the intracratonic and passive-margin Proterozoic basins of the SÃO FRANCISCO Craton: The Bambuí/Una and Vazante Groups.** In: VII South American Symposium on Isotope Geology, Brasília, DF.
- Misi, A.; Kaufman, A.J.; Azmy, K.; Oliveira, T.F.; Pinho, J.M.; Sanches, A.L. (2010b). **O Grupo Vazante em vista de novos dados geológicos e geocronológicos. Implicações para a metalogênese (Zn-Pb) e a fosfogênese das bacias Proterozoicas do Cráton do São Francisco.** In: 45 Congresso Brasileiro de Geologia, 2010, Belém.
- Misi, A.; Azmy, K.; Kaufman, A.J.; Oliveira, T.F.; Pinho, J.M.; Sanches, A.L. (2011). **High resolution chemostratigraphy and Re-Os ages of organic shales of the Vazante Group (Minas Gerais, Brazil): Implications for mineral exploration modelling.** In: XIV Congreso Latinoamericano de Geologia, 2011, Medellín. *Memorias*, 2011(1):410-411.
- Misi, A.; Azmy, K.; Kaufman, A.J.; Oliveira, T.; Sanches, A.; Oliveira, G.D. (2014). **Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: Implications to metallogenic and phosphogenic models.** *Ore Geology Reviews*, 63:76-90.
- Moeri, E. (1972). **On a columnar stromatolite in the Precambrian Bambui Group of Central Brazil,** *Ecl. Geol. Helv*, v. 65, p185-195.
- Monteiro, C.F. (2009). **Fosforitos do Grupo Bambuí na região de Campos Belos (GO)/Arraias (TO), na borda oeste do Cráton São Francisco.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Moura, F.G (2018). **O Grupo Quilombo e seu embasamento na porção sul da Faixa Brasília.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Nelson, G.J.; Pufhal, P.K.; Hiatt, E.E. (2010). **Paleoceanographic constraint on Precambrian phosphorites accumulation, Baraga Group, Michigan, USA.** *Sedimentary Geology* 226:9-21.
- Neves, B.B.B.; Alkmin, F.F. (1993). **Cráton: Evolução de um conceito.** In: simpósio sobre o cráton do São Francisco, 2., Salvador, 1993. *Anais. Salvador, SBG/SGM/CNPq*, 1993. p.1-10.
- Nogueira, G.M.S. (1993). **Enquadramento litoestratigráfico, sedimentologia e evolução geoquímica do Depósito Fosfático de Lagamar, MG - Formação Vazante - Proterozoico Médio.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Oliveira, M. (2011). **Mapeamento geológico (1: 50.000) da região dos depósitos fosforíticos rocinha e lagamar, Oeste de Minas Gerais, com aplicação de aerogamaespectrometria e aeromagnetometria.** *Belo Horizonte*.
- Papineau, D. (2010). **Global Biogeochemical Changes at Both Ends.** *Astrobiology*, 10(2):165-181.
- Pimentel, M.; Dardenne, M.A.; Fuck, R.; Viana, M.; Junges, S.; Fischel, D.; Dantas, E.L. (2001). **Nd isotopes and the provenance of detrital sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil.** *Journal of South American Earth Sciences*, 14(6), 571-585.

- Pimentel, M.M.; Rodrigues, J.B.; Della Giustina, M.E.S.; Junges, S.; Matteini, M.; Armstrong R. (2011). **The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS UePb sedimentary provenance data: A review.** *Journal of South American Earth Sciences* 31: 345-357.
- Pufahl, P.K. (2010). **Bioelemental sediments**, in James, N.P., and Dalrymple, R.W., eds., *Facies models*, 4th ed.: Geological Association of Canada, p. 477-503.
- Pufahl, P.K.; Hiatt, E.E. (2012). **Oxygenation of the Earth's ocean-atmosphere system: a review of physical and chemical sedimentological responses:** *Marine and Petroleum Geology*, v. 32:1-20.
- Pufahl, P.K.; Lee, A.G. (2016). **Sedimentary and Igneous Phosphate Deposits: Formation and Exploration: An Invited Paper.** *Economic Geology* 112.3 (2017):483-516.
- Rodrigues, J.B. (2008). **Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí: um estudo de zircões detríticos e idades modelo Sm-Nd.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Rocha Araujo; P. R., Flicoteaux; R., Parron; C., & Trompette, R. (1992). **Phosphorites of Rocinha Mine; Patos de Minas (Minas Gerais, Brazil); genesis and evolution of a middle Proterozoic deposit tectonized by the Brasiliano Orogeny.** *Economic Geology*, 87(2), 332-351.
- Rodrigues, J.B.; Pimentel, M.M.; Buhn, B.; Matteini, M.; Dardenne, M.A., Alvarenga, C.J.S. (2012). **Armstrong Provenance of the Vazante Group: New U-Pb, Sm-Nd, Lu-Hf isotopic data and implications for the tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt.** *Gondwana Res*:439-450.
- Rostirolla, S.P.; Mancini, F.; Neto, J.M.D.R.; Figueira, E.G. & de Araújo, E.C. (2002). **Análise estrutural da mina de Vazante e adjacências: geometria, cinemática e implicações para a hidrogeologia.** *Revista Brasileira de Geociências*, 32(1):59-68.
- Sanches, A.L. (2012). **Fosforitos Neoproterozoicos dos Grupos Vazante (MG) e Una (BA): Origem, Idades e Correlações.** Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia.
- Sanches, A.L.; Misi, A.; Azmy, K. (2016). **As sucessões carbonáticas neoproterozoicas do Cráton do São Francisco e os depósitos de fosfato: correlações e fosfogênese.** *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4 suppl):182-194.
- Signorelli, N.; Pinho, J.M.M.; Tuller, M.P.; Baptista, M.C.; Brito, D.C. (2013). **Folha Lagamar-SE. 23-YA-III: carta geológica-escala 1: 100.000.**
- Silva, C.H. (2003). **Evolução geológica da Faixa Brasília na região de Tapira, sudoeste de Minas Gerais.** *Tese de Doutorado*, IGCE-UNESP.
- Sousa A.E. (2001). **Balanco Mineral Brasileiro de Fosfato.** Brasília, DNPM/MME, p1-3.
- Souza, J.C.F. (1997). **Litoestratigrafia e sedimentologia da Formação Vazante na região de Coromandel (MG).** *MSc Thesis*, University of Brasília, 75p.
- Uhlein A.; Trompette R.R.; Alvarenga C.J.S. (1999). **Neoproterozoic glacial and gravitational sedimentation on a continental rifted margin: The Jequitai-Macaúbas sequence (Minas Gerais, Brazil).** *J. South Am. Earth Sci.*, 12:435-451.
- Warren, L. V., Quaglio, F., Riccomini, C., Simões, M. G., Poiré, D. G., Strikis, N. M. & Strikis, P. C. (2014). **The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway.** *Geology*, 42(5), 391-394.

Mapa de Pontos - Coromandel



Mapa Geológico - Coromandel



APÊNDICE 3 - ARTIGO SUBMETIDO

Anuário de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro

DETECÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE ROCHAS FOSFATADAS A PARTIR DE CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA VOLTADA AO OBJETO: ESTUDO DE CASO EM DEPÓSITOS DE COROMANDEL (MG)

DETECTION OF PHOSPHATE ROCKS FROM EXAMPLE - BASED SUPERVISED CLASSIFICATION: CASE STUDY ON COROMANDEL REGION DEPOSITS, STATE OF MINAS GERAIS, BRAZIL

Lucas Santos Batista Teles; José Eloi Guimarães Campos; Tati de Almeida; Rejane Ennes Cicerelli & Elder Yokoyama

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro. Instituto de Geociências – IGD. CEP 70.910-900 – Brasília DF. Caixa Postal 04465. CEP 70919-970. Endereço eletrônico; lsbteles@gmail.com; eloi@unb.br; tati_almeida@unb.br; rejane_ig@unb.br; elder.yokoyama@gmail.com.

Resumo

A contínua e crescente necessidade das atividades humanas por insumos fosfatados estimulam a criação e desenvolvimento de novos métodos e ferramentas de pesquisa que possam auxiliar na prospecção de novas áreas fontes deste minério. Desta forma, o presente artigo tem por objetivo propor a aplicação da técnica de Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto para a geração de um mapa binário que discrimine as Unidades Fosfatadas e Não Fosfatadas inseridas no contexto geológico da Formação Retiro, base do Grupo Vazante, aflorantes na região de Coromandel (MG). Para tal finalidade, os dados de entrada utilizados, foram o Modelo Digital de Elevação (ALOS/PALSAR - 12.5m) e mapas temáticos gamaespectrométricos quantitativos relativos às concentrações dos radioelementos Urânio e Tório em ppm. Após a etapa de geração do mapa de classificação, o resultado foi validado a partir da comparação com a verdade terrestre por meio do Coeficiente Kappa que resultou em 82%.

Palavras-chave: Classificação Supervisionada; Fosfato Sedimentar; Sensoriamento Remoto.

Abstract

The continuous and increasing need of human activities for phosphate inputs stimulates the creation and development of new methods and research tools that can help in the prospection of new sources of this ore. The objective of this article is to purpose the application of the Object Based Supervised Classification technique to generate a binary map that can discriminates the Phosphate and Non - Phosphate Units inserted in the geological context of the Retiro Formation, base of the Vazante Group, outcropping in the region of Coromandel (MG). For this purpose, the input data used were the Digital Elevation Model (ALOS / PALSAR - 12.5m) and quantitative gammaespectrometric thematic maps related to the concentrations of the Uranium and Thorium radioelements in ppm. After the generation of the classification map, the result was validated from the comparison with terrestrial truth using the Kappa Coefficient, which resulted in 82%.

Keywords: Supervised Classification; Sedimentary Phosphate; Remote Sensing.

1 - Introdução

O fosfato é muito utilizado no Brasil, devido à sua importância econômica na indústria de fertilizantes. No entanto, o país ainda apresenta forte dependência externa desse insumo, já que a extração de rochas fosfáticas não acompanha o crescimento da indústria de fertilizantes provocando um custo elevado para esse setor de relevante importância econômica (Fonseca & Silva (2014)). Assim, há a necessidade de investigação de novos alvos prospectivos em áreas potenciais (Abram *et al.* (2011); Abram *et al.* (2016)).

Cerca de 80% da produção de fosfato no Brasil é de origem ígnea, associada a complexos alcalino-carbonatíticos, geralmente situados ao longo do azimute 125° (Souza (2001)). No entanto, o potencial de depósitos sedimentares, associados às bacias proterozoicas, carece de estudos mais específicos para avaliação da potencialidade dessas áreas dentro do cenário nacional de produção. Dentre os depósitos fosfáticos já reconhecidos nas bacias sedimentares, destacam-se os inseridos na Faixa de Dobramentos Brasília, hospedados em rochas das formações Sete Lagoas e Serra da Saudade do Grupo Bambuí e das formações Retiro e Rocinha do Grupo Vazante. A ocorrência da Formação Retiro, base do Grupo Vazante, foi estudada inicialmente, e quase exclusivamente, por Dardenne *et al.* (2001) e tendo em vista a escassez de trabalhos geológicos sobre seu potencial mineral, foi selecionada como área de estudo desse artigo.

Youssef (1965) e Oliveira (1970) correlacionaram às ocorrências sedimentares de rochas pelíticas fosfatadas e fosforitos às formas de relevo muito bem definidas (encostas arredondadas e topografia proeminente) que são o resultado da alta susceptibilidade dessas rochas ao intemperismo e erosão. A utilização de dados geofísicos de gamaespectrorradiometria apresentou resultados promissores na delimitação de alvos exploratórios (Diner *et al.* (1998); Sousa & Ferreira (2005); Fianco *et al.* (2014)), sendo que alguns estudos demonstram uma correlação direta entre locais com a presença de P_2O_5 e altos valores de emissão de raios gama (Santos *et al.* (2008)). Mais recentemente, o uso de imagens óticas multiespectrais e termais de sensoriamento remoto e de avançadas técnicas de processamento de imagens para prospecção regional de rochas fosfatadas, vêm sendo aplicadas sistematicamente (Vitarello *et al.* (1993); Da Cruz *et al.* (2011); Teixeira (2012); Da Costa (2017)). No entanto, a presença de minerais de óxido e hidróxido de ferro, argilominerais autigênicos e a cobertura vegetal dificultam, em certo grau, a discriminação de rochas fosfatadas e a identificação de novos alvos utilizando essa tecnologia (Teixeira (2012)). Por outro lado, não se tem registro bibliográfico da utilização de Classificação Supervisionada Orientada ao Objeto para a determinação de alvos fosfatados. Segundo Chubey *et al.* (2006), as vantagens de se usar essa técnica decorrem da multiplicidade

de informações derivadas de um objeto-imagem em relação àquelas de pixels individuais, sendo assim, as informações extraídas não se baseiam somente nas assinaturas espectrais como também levam em consideração as características geométricas, texturais e contextuais para delimitação dos objetos.

Nesse sentido, esse trabalho objetivou desenvolver uma metodologia visando detectar áreas de ocorrência de rochas fosfatadas no município de Coromandel (MG) utilizando-se dados de modelo digital de elevação (MDE), gamaespectrorradiometria e processamento digital de imagens multiespectrais de alta resolução espacial com base na análise de atributos espaciais/espectrais de forma e textura (Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto).

2 - Área de Estudo e Metodologia

A área de estudo localiza-se no município de Coromandel (MG), inserido na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, a cerca de 430 km de Brasília (Figura 1).

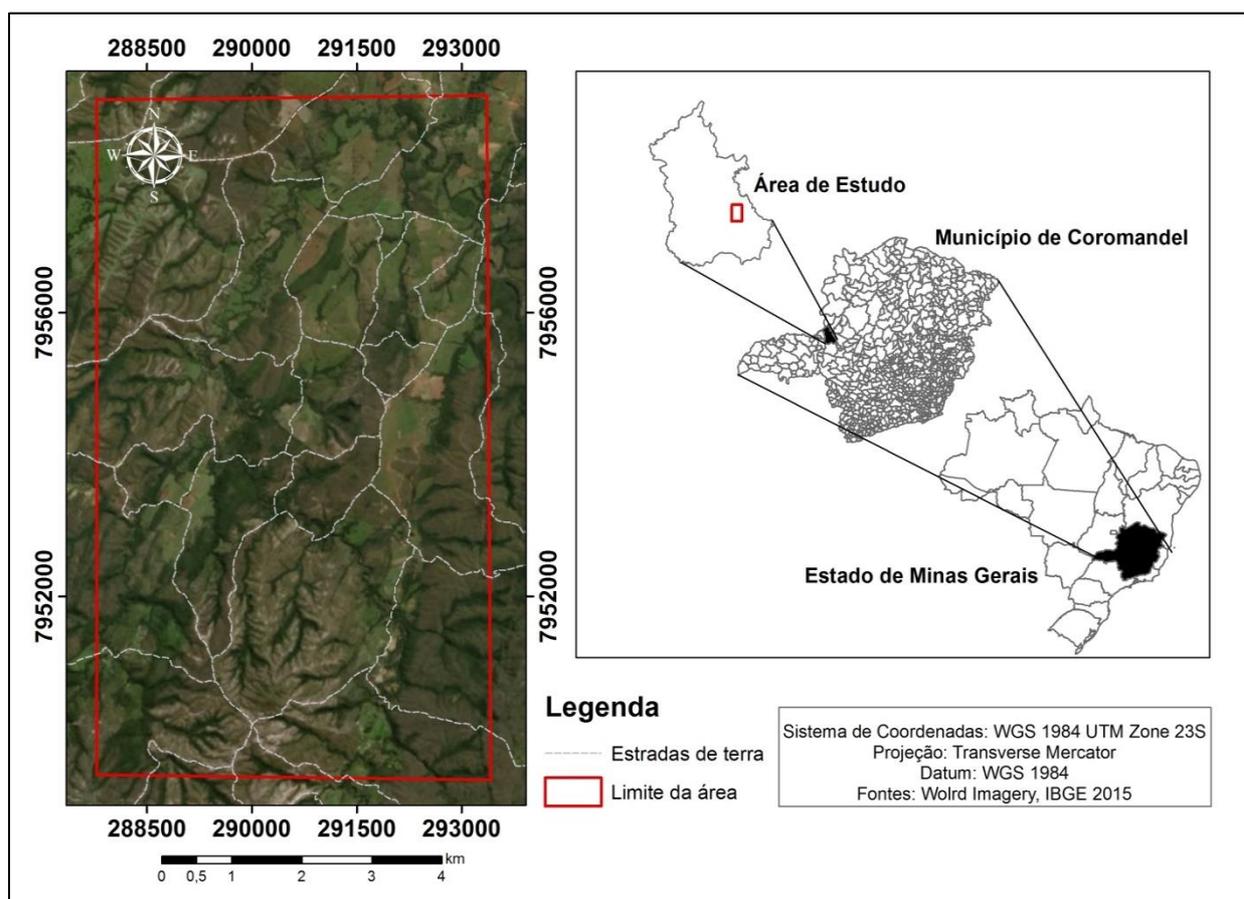


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo elaborado na escala de 1:60.000.

É caracterizada, geologicamente, pela presença das rochas de duas grandes unidades litoestratigráficas inseridos no contexto geotectônico da Faixa de Dobramentos Brasília: o Grupo Canastra e o Grupo Vazante. As rochas do Grupo Canastra ocorrem nas extremidades leste e

oeste da área e são caracterizadas por clorita-fengita-quartzo filitos do Membro Serra da Anta, topo da Formação Paracatu, e quartzitos finos esbranquiçados da Formação Serra da Batalha.

Nos locais dominados pelo Grupo Canastra, a geomorfologia é marcada por relevos mais elevados. Os filitos do Membro Serra da Anta ocorrem associados à extensas chapadas, enquanto os quartzitos da Formação Serra da Batalha são responsáveis pela sustentação de proeminentes morros escarpados.

O Grupo Vazante, por outro lado, ocorre como uma faixa alongada e de direção NE-SW na porção central da área de estudo, onde afloram rochas da Formação Retiro, unidade mais basal do Grupo cercada pelos contatos tectônicos (falha de empurrão) com o Grupo Canastra. A Formação Retiro é caracterizada pela sucessão de 3 associações de litofácies distintas, que compreendem às Unidades Rudácea, Fosfatada e Pelítica, que foram depositadas em um ambiente marinho raso com forte influência glacial e de eventos imediatos à deglaciação.

As rochas fosfatadas, principal objeto de estudo, ocorrem intrinsecamente relacionadas às bordas dos corpos da Unidade Rudácea e compreendem as rochas de sedimentação química como fosforitos, siltitos fosfatados (pretos quando frescos e amarelos quando alterados) e brechas fosfatadas.

A metodologia de trabalho envolveu a construção do banco de dados de geofísica aérea e de imagens orbitais, além de sua integração, a qual pode ser sintetizada segundo o fluxograma da Figura 2.

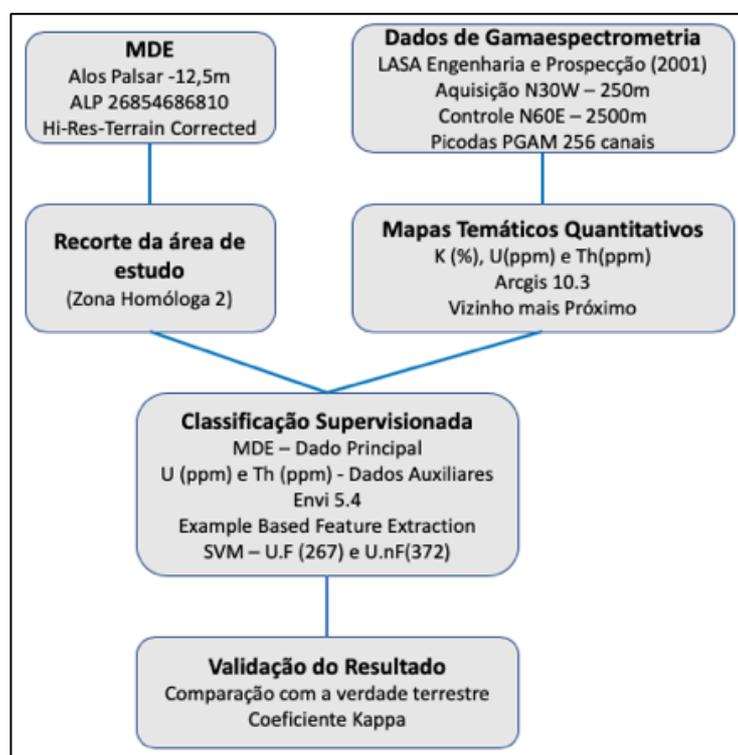


Figura 2 - Fluxograma de trabalho mostrando, de forma simplificada, toda a sequência de atividades.

2.1 Dados de Sensoriamento Remoto

As características físicas da maior parte dos depósitos fosfáticos sedimentares brasileiros estão diretamente relacionadas com os aspectos geomorfológicos locais. Geralmente as concentrações de rochas fosfatadas ocorrem na forma de morrotes com encostas suaves e topos arredondados que são o resultado da forte ação de processos intempéricos e erosivos (Oliveira, 1970). Apesar de na área de estudo essa relação aparentar-se de forma mais sutil, a compartimentação topográfica construída pelo modelo digital de elevação, representa um importante dado de entrada no processo de classificação supervisionada.

Assim, para o entendimento da fisiografia e a compartimentação geomorfológica da área de estudo foram obtidas imagens do sensor RapidEye (<http://geocatalogo.mma.gov.br/>) de 5 metros de resolução e Modelo Digital de Elevação obtido a partir do satélite PALSAR ALP268546810 (*Alaska Satellite Facility*). O subproduto do sensor PALSAR, *Hi-res Terrain Corrected*, possui resolução espacial de 12,5 metros e precisão vertical compatível com a escala 1:25.000 (Igarachi, 2001). As imagens ópticas permitiram a individualização de zonas homólogas da área utilizando a metodologia de análise de padrões de drenagem proposta por Soares & PioFiori (1976), enquanto o MDE discriminou as unidades geomorfológica a partir da metodologia de Neto (2015).

2.2 - Dados de Gamaespectrometria

Uma característica marcante dos depósitos de fosfato de origem sedimentar é sua fácil associação com elementos traços como selênio, molibdênio, zinco, cobre, cromo, elementos terras raras e em especial o urânio. A correlação do urânio com os fosfatos se dá pela substituição do elemento P pelo U no sítio do ânion, principalmente nos depósitos de origem sedimentar. Os valores médios da concentração de U em fosforitos variam de 50 a 200 ppm sendo que nas fácies mais ricas em matéria orgânica, esses valores podem atingir até 3000 ppm (Jarvis *et al.* (1994)). Por outro lado, a presença de tório nessas rochas é mais discreta, porém valores de 0,5 a 8,6 ppm foram relatados por Monteiro (2009) em fosforitos e rochas fosfatadas sedimentares da base do Grupo Bambuí.

Em consequência dessa associação, os levantamentos de gamaespectrometria tornam-se uma das formas mais eficientes de se localizar a ocorrência de depósitos dessa natureza (Ashfahani (2002)). No caso do trabalho em específico, a região de pesquisa encontra-se inclusa no polígono da área 01 do Programa 2001 da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG/ Lasa Engenharia e Prospecção S.A). Este aerolevantamento foi realizado na direção N30W com espaçamento de 250 metros e com linhas de controle que tiveram direção N60E e espaçamento de 2500 metros.

Para a confecção dos mapas quantitativos relativos aos elementos potássio (K), tório (Th) e urânio (U), o banco de dados gamaespectrométricos foi exportado para o *software Geosoft Oasis Montaj Standart Version 4.2*. Por *default*, esse software disponibiliza 3 formatos diferentes de saída dos dados processados, sendo que o dado de maior resolução radiométrica pode ser exportado como arquivo tiff de 16 bits, sendo assim, o banco de dados foi transformado em dado vetorial (estrutura de pontos) e importado para o *software ArcGis 10.3*, no qual foram gerados 3 mapas temáticos com resolução espectral de 32 bits, relativos às variações quantitativas de potássio (K) em porcentagem, e de tório (Th) e urânio (U) em ppm. Esses mapas temáticos foram confeccionados a partir da interpolação dos canais relativos às contagens dos 3 radioelementos do gamaespectrômetro, por meio do interpolador de *Natural Neighbor*, no qual o algoritmo interpolador utiliza-se do método de TIN para a identificação de pontos adjacentes e determina a influência ou o peso de cada ponto no modelo a partir de polígonos de Thiessen (Maune *et al.* (2001)) resultando em superfícies mais homogêneas, mesmo com distribuição errática de dados, além de possuir maior eficiência de processamento (Galvanin & Dal Poz (2013)).

2.3 - Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto

Após a preparação dos dados de entrada, foi realizada a Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto. A classificação foi realizada pela ferramenta *Example-based Feature Extraction* do software *Envi 5.4*, no qual o modelo digital de elevação (ALOS) assumiu a função de dado de entrada principal e as bandas relativas ao tório (Th) e urânio (U), de dados auxiliares, que aumentam a acurácia e precisão da classificação (Lawrence (2001)). Para a criação das amostras de treinamento, a imagem foi segmentada com o algoritmo *Edge* com nível de escala, que ressalta ao máximo as bordas das feições sem segmentá-las, igual à 10 e configuração de fusão, que agrega os elementos menores aos maiores, com o algoritmo *Full Lambda Schedule* (FLS) com o valor igual a 10 e tamanho Kernel de 3.

Após a segmentação, na etapa de seleção dos atributos, os parâmetros utilizados foram os de *default* do software, sendo que dessa maneira, todos os aspectos texturais, espectrais e espaciais das regiões de treinamento foram considerados na classificação.

Por fim, foi selecionado o algoritmo de classificação *Support Vector Machine* (SVM) que apresentou maior robustez no processamento. Esse algoritmo é baseado na solução de um problema quadrático dependente dos vetores de treinamento escolhidos e dos parâmetros selecionados (Vapnik (1995)). Subsequente à etapa de parametrização foram selecionadas as amostras de treinamento em duas classes distintas: unidades fosfatadas e a unidades não fosfatadas. Para as unidades fosfatadas foi selecionado um total de 267 amostras, escolhidas com

base nas regiões que apresentavam as mais altas concentrações de U e Th e topografias com formas mais arredondadas. Por outro lado, as unidades não fosfatadas contaram com a escolha de 372 amostras, que representavam os locais com as concentrações mais baixas desses elementos.

Em função das dimensões da área de estudo o número de 639 amostras de treinamento é considerado adequado e suficiente.

2.4 - Validação do Resultado

A validação do resultado obtido a partir da metodologia explicitada consistiu na comparação do produto da classificação supervisionada com a verdade terrestre por meio do Coeficiente Kappa (Landis & Koch (1977)). A verdade terrestre foi definida a partir de 39 pontos de campo, distribuídos aleatoriamente e que não foram selecionados como amostras de treinamento do classificador. Dos 39 pontos de campo, foram descritos 16 afloramentos de fosforitos e siltitos fosfatados (F) e 23 afloramentos de diamictitos e pelitos não fosfatados (NF). As rochas fosfatadas foram identificadas em campo a partir das suas características mineralógicas, estruturais e texturais além da sua reação ao de molibdato de amônio e análises de difração de Raios-X e de Fluorescência de Raios-X para a confirmação da existência de minerais de fosfato.

Os pontos de validação foram identificados em uma série de trabalhos de campo realizados na região, nos quais além da coleta de amostras para análises, também se realizou a descrição das diferentes litofácies, construção de seções estratigráficas de detalhe, levantamento de dados estruturais e caracterização dos ambientes deposicionais das rochas glaciogênicas e fosfatadas.

3 - Resultados e Discussões

A extração sistemática das feições utilizando o método de Soares & PioFiori (1976) em imagens de alta resolução permitiu a individualização de zonas homólogas orientadas, preferencialmente na direção NNE, definidas principalmente pela forma e densidade da rede de drenagem, como mostra a Figura 3.

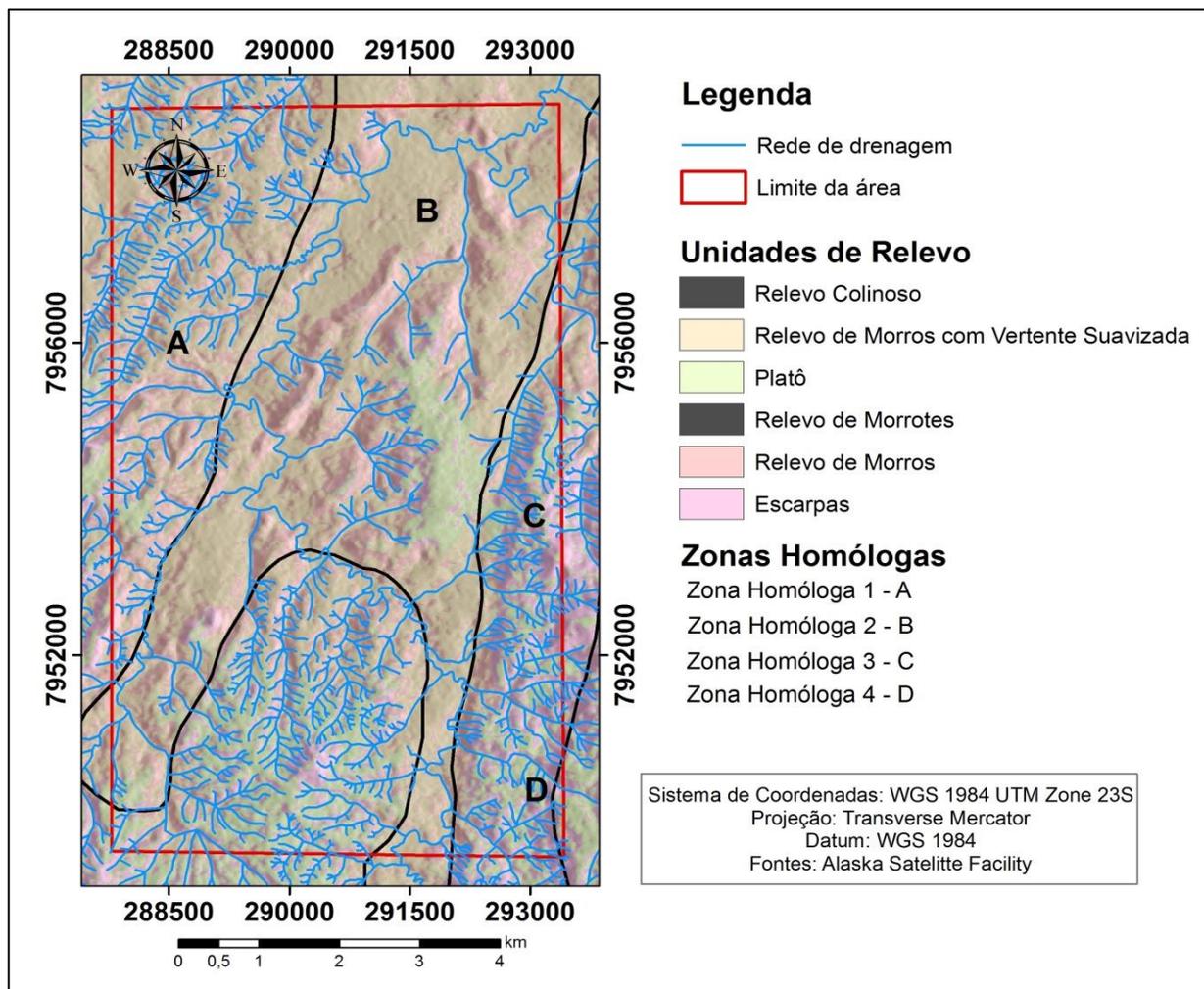


Figura 3 - Mapa de compartimentação geomorfológica (Neto (2015)) da área superposto ao Modelo Digital de Elevação do sensor Palsar, na escala de 1:60.000. Os traços escuros representam os limites de zonas homólogas definidas a partir da metodologia de análise do padrão de drenagens desenvolvida por Soares & Pio Fiori (1976).

A unidade fosfatada da Formação Retiro ocorre intrinsecamente associada à zona homóloga 2. Na parte central dessa zona, ocorrem lentes de siltitos fosfatados e fosforitos que circundam núcleos de diamictitos ou ocorrem entremeados à siltitos estratificados.

De acordo com a Figura 4, o resultado obtido após os processamentos e etapas descritas na metodologia mostrou-se adequado aos objetivos do trabalho. As ocorrências de rocha fosfatada na região de Coromandel-MG foram discriminadas pela Classificação Supervisionada e apresentaram boa correlação com os dados observados em campo.

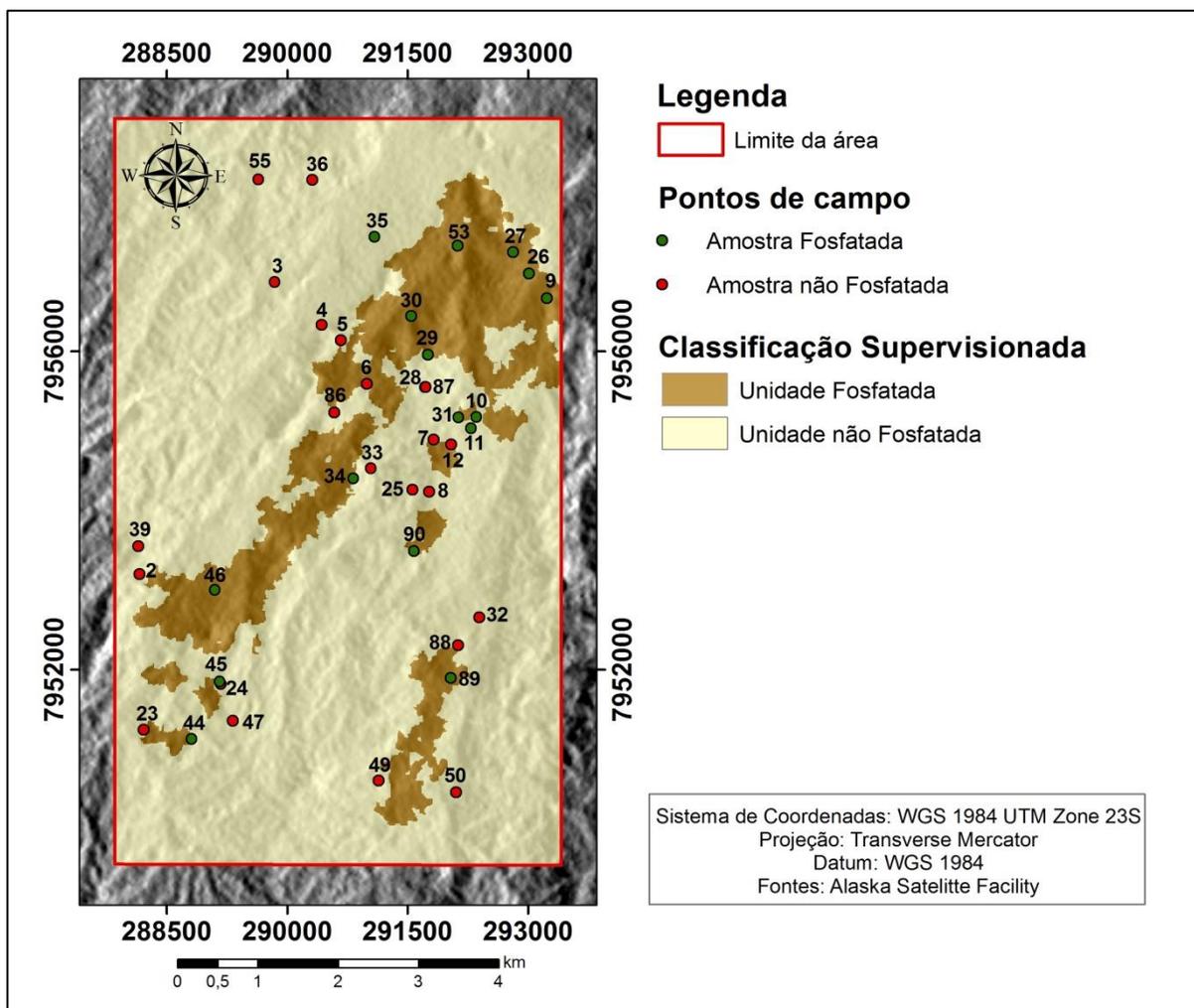


Figura 4 - Mapa binário da Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto superposto ao Modelo Digital de Elevação do sensor Palsar, na escala de 1:60.000.

O produto final da classificação mostra que a ocorrência da unidade fosfatada se exhibe na forma de zonas descontínuas, de limites bem demarcados e direção NE-SW que perfazem aproximadamente 20% (11 km²) da área de estudo (Figura 4). Além da geometria, a classificação mostra que as ocorrências estão restritas à porção central da área, sem a presença de ocorrências nas adjacências, demonstrando que essa acumulação de fosfato está fortemente relacionada a um modelo metalogenético específico.

Para demonstrar a correlação entre o produto da classificação e a verdade terrestre, os pontos observados em campo foram avaliados por meio do coeficiente Kappa e classificados segundo a tabela de Landis & Koch (1977).

Dos 39 pontos de campo observados, 32 se encaixaram nas suas respectivas classes de classificação, resultando em um coeficiente Kappa com valor igual a 0.82. Os pontos relativos à unidade não fosfatada que caíram dentro da classe fosfatada, e que compreendem a maior parte

dos 7 pontos destoantes, marcam as interfaces de contato entre as duas classes, mostrando novamente a robustez da classificação obtida.

Assim, de forma geral os pontos de controle de campo estão sobrepostos às áreas em que a classificação demarca áreas de ocorrência de rochas fosfatadas. As raras exceções são atribuídas a questão da escala do estudo, que não permite verificar, por exemplo, a atuação de processos erosivos que podem ser responsáveis pelo transporte e acumulação de delgadas camadas de material fosfatado sobre rochas não fosfatadas. Por outro lado, os pontos de rochas não fosfatadas plotados sobre a poligonal de rochas fosfatadas são em parte relativos a diamictitos glaciais que podem conter razões elevadas de urânio não associado à presença de fosfato.

Quando comparados os tipos de classificações supervisionadas e seus respectivos classificadores disponíveis no software utilizado (PCA, KNN, SVM), observa-se que entre esses existem grandes diferenças em suas aplicações. O algoritmo *Principal Components Analysis* (PCA) que se baseia na comparação entre cada segmento da imagem com as amostras de treinamento escolhidas na direção de principal componente da imagem e os agrupa em classes com valores semelhantes, torna-se um classificador limitado para um local que apresenta ampla heterogeneidade de feições, como é o caso da área estudada. Por outro lado, o classificador *K Nearest Neighbor* (KNN), método que classifica cada segmento em relação à sua distância Euclidiana das amostras de treinamento, apresenta uma boa eficiência na separação entre elementos de classes similares, no entanto, mesmo sendo um classificador robusto, não foi aplicável a situação de Coromandel, tendo em vista a grande segmentação da área de estudo. Essa mesma situação foi relatada por autores que se propuseram a realizar classificações supervisionadas para confecção de mapas de uso e ocupação de solos, como Sarmiento *et al.* (2014) e Garofalo *et al.* (2014). Sendo assim, o algoritmo de melhor rendimento e que resultou no produto de maior confiabilidade foi o *Support Vector Machine* (SVM).

4 - Conclusão

A partir do produto gerado e sua correlação com a verdade terrestre, nota-se que as técnicas de Processamento de Imagens, amplamente difundidas na geologia ambiental, são facilmente capazes de manipular dados de geofísica como auxiliares e se tornam poderosas ferramentas de auxílio à geologia de exploração mineral.

A Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto demonstrou-se uma técnica bastante robusta, tendo em vista a sua capacidade de entrada de dados e interatividade com o conhecimento do usuário. No caso da Unidade Fosfatada de Coromandel (MG), a utilização de

dados auxiliares de gamaespectrometria foi essencial para o resultado, pois estes dados geofísicos foram os maiores responsáveis pela delimitação segura das ocorrências.

Por fim, o presente trabalho abre uma porta de possibilidades de utilização dessa técnica para a busca de novas ocorrências de fosfato que apresentam características similares às de Coromandel, como a correlação geomorfológica e associação com os radioelementos Th e U.

5 - Referências Bibliográficas

- Abram M.B.; Bahiense I.C.; Porto C.G. & Brito R.S.C. 2011. Projeto Fosfato Brasil - Parte I. INFORME DE RECURSOS MINERAIS. Série Insumos Minerais para Agricultura, n° 13. Salvador, CPRM. 526p.
- Abram, M.B.; Cunha, I.D.A. & Almeida, R.C.D. 2016. Projeto Fosfato Brasil - Parte II. INFORME DE RECURSOS MINERAIS. Série de Insumos Minerais para Agricultura, n° 17. Salvador, CPRM. 1139p.
- Asfahani, J. 2002. Phosphate prospecting using natural gamma ray well logging in the Khneifiss Mine, Syria. *Exploration and Mining Geology*, 11(1):61-68.
- Chubey, M.S.; Franklin, S.E. & Wulder, M.A. 2006. Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 72(4):383-394.
- Da Costa, M.A.C. 2017. Espectroscopia de reflectância de rochas da Suíte Alcalina Juquiá, sudeste do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Santos, 2017. *Resumos expandidos*, p. 5257-5265.
- Da Cruz, J.R.; de Souza Filho, C. R.; Abram, M.B. & Marcon, R. 2011. Caracterização espectral do depósito de fosfato de Araxá (MG). In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Curitiba, 2011. *Resumos Expandidos*, p. 3530-3537.
- Dardenne, M.A. 2001. Lithostratigraphic sedimentary sequences of the Vazante Group. *IGCP* (450):48-50.
- Diner, D. J.; Beckert, J. C.; Reilly, T. H.; Bruegge, C. J.; Conel, J. E.; Kahn, R. A. & Gordon, H. R. 1998. Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4):1072-1087.
- Fianco, C.B.; Vidotti, R.M. & Pires, A.C.B. 2014. Phosphorite prospecting using ground gamma spectrometry in northeast Goiás state, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32 (4): 721-733.
- Fonseca, D. S.; Silva, T. H. C. 2013. Sumário Mineral Brasileiro – Fosfato. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasília, 148p.
- Galvanin, E. S. & Dal Poz, A. P. 2013. Sistema lidar e métodos de interpolação de dados. *Revista de Geografia*, 30 (1): 91-102
- Garofalo, D.F.T.; Messias, C.G.; Liesenberg, V.; Bolfe, É.L. & Ferreira, M.C. 2015. Análise comparativa de classificadores digitais em imagens do Landsat-8 aplicados ao mapeamento temático. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(7):593-604.
- Igarashi, T. 2001. ALOS mission requirement and sensor specifications. *Advances in Space Research*, 28(1),127-131.

- Jarvis, I.; Burnett, W.C.; Nathan, Y.; Almbaydin, F.S.M.; Attia, A.K.M.; Castro, L.N.; Flicoteaux, R.; Hilmy, M.E.; Husain, V.; Qutawnah, A.A.; Serjani, A. & Zanin, Y.N. 1994. Phosphorite geochemistry-state-of-the-art and environmental concerns. *Eclogae Geologicae Helveticae*, (87):643-700.
- Landis, J.R. & Koch, G.G. 1977. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, (5): 363-374.
- Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2001. Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais, Área 01. Projeto Unaí-Vazante-Paracatu-Coromandel. Secretaria de Estado de Minas e Energia - SEME - Governo de Minas Gerais. 120p.
- Maune, D.F.; Huff, L.C. & Guenther, G.C. 2001. Digital elevation model technologies and applications: the DEM user's manual. The American society for photogrammetric and Remote Sensing, Bethesda. p. 367-394.
- Monteiro, C.F. 2009. *Fosforitos do Grupo Bambuí na região de Campos Belos (GO)/Arraias (TO), na borda oeste do Cráton São Francisco*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado,
- Neto, G.B.S. 2015. *Método de classificação semiautomático das unidades básicas de relevo em regiões tropicais*. Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 54 p.
- Oliveira, F.A.D. 1970. *Fosfato do Tennessee: Relatório de viagem aos Estados Unidos*. Rio de Janeiro, CPRM. 18p.
- Santos, A.C.L.D.; Menezes, P.D.T.L. & Nascimento, C.T.C.D. 2008. Gamaespectrometria aplicada em solo agrícola no noroeste do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(2):181-194.
- Sarmiento, C.M.; Ramirez, G.M.; Coltri, P. P.; Silva, L.F.L.; Nassur, O.A.C. & Soares, J.F. 2014. Comparação de classificadores supervisionados na discriminação de áreas cafeeiras em Campos Gerais-Minas Gerais. *Coffee Science*, 9(4):546-557.
- Soares, P.C. & Fiori, A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, 16(32):71-104.
- Sousa A.E. 2001. Balanço Mineral Brasileiro de Fosfato. Brasília, DNPM/MME, p.1-3.
- Souza, J.L.D. & Ferreira, F.J.F. 2005. Anomalias aerogamaespectrométricas (K, eU e eTh) da quadrícula de Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(3):251-274.
- Teixeira, R.D.A. 2012. Avaliação espectral de depósitos de fosfatos utilizando imagens ASTER das regiões de Campos Belos e Catalão (GO). Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 23p.
- Vapnik, V. 1995. The Nature of Statistical Learning Theory. New York: *Springer-Verlag*. 188p.
- Vitorello, I.; Galvão, L.S. & Paradella, W.R. 1993. Diferenciação Espectrorradiométrica de Lateritas Mineralizadas do Complexo de Maicuru (PA). *In: 3RD INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY*, Rio de Janeiro, 1993. *Resumos expandidos*, p. 988-992.
- Youssef, M.A. 1965. Genesis of bedded phosphates. *Economic geology*, 60(3):590-600.