



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 615

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DOS DEPÓSITOS DE
FOSFATOS ALUMINOSOS LATERÍTICOS DA REGIÃO
BONITO-OURÉM, NO ESTADO DO PARÁ**

Dissertação apresentada por:

ALAN FELIPE DOS SANTOS QUEIROZ

Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA)

**BELÉM-PARÁ
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- Q3m Queiroz, Alan Felipe dos Santos.
Mineralogia e geoquímica dos depósitos de fosfatos aluminosos
lateríticos da região Bonito-Ourém, no Estado do Pará / Alan Felipe dos
Santos Queiroz. — 2022.
xiv, 51 f. : il. color.
- Orientador(a): Dr. Marcondes Lima da Costa
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e
Geoquímica, Belém, 2022.
1. Lateritização. 2. Fertilizantes fosfatados. 3. Amazônia.
I. Título.

CDD 622.1



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DOS DEPÓSITOS DE
FOSFATOS ALUMINOSOS LATERÍTICOS DA REGIÃO
BONITO-OURÉM, NO ESTADO DO PARÁ**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR:

ALAN FELIPE DOS SANTOS QUEIROZ

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA, linha de Pesquisa MINERALOGIA E GEOQUÍMICA**

Data de Aprovação: 02 / 03 / 2022

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa
(Orientador – UFPA)


Prof. Dr. Herbert Pöllmann (*in memoriam*)
(Membro - Martin Luther University of Halle - Wittenberg)


Prof.ª Dr.ª Adriana Maria Coimbra Horbe
(Membro – UnB)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por incontáveis motivos;

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa, pela orientação neste trabalho;

Ao Professor Herbert Pöllmann (*in memoriam*), por ter aceitado corrigir esta dissertação e pelas palavras de incentivo que tanto precisava; infelizmente dias depois de entregar o parecer, o professor Herbert veio a falecer subitamente; uma perda irreparável;

À então empresa Phosfaz Fertilizantes e a todos os seus funcionários, em especial ao geólogo Msc. Daniel Chaves pela hospitalidade, por propiciar a visita e a coleta de amostras dos alvos deste trabalho e pelas inúmeras contribuições em campo e durante o mestrado;

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de mestrado e pelo financiamento das atividades analíticas desse trabalho através de processos 442871/2018-0 e 305016/2016-8 em nome do professor Marcondes Lima da Costa;

Ao Laboratório de Laminação e aos técnicos (e amigos do coração) Joelma Lobo e Bruno Fernandes, pela confecção das lâminas, pelas conversas e pelos momentos de descontração; Ao Laboratório de Sedimentologia, ao técnico Everaldo Cunha e ao Professor Afonso Nogueira, pela utilização da oficina e apoio na preparação de amostras; Às professoras Vânia Barriga e Andréia Pereira pelo acolhimento, pelas conversas, pelos valiosíssimos ensinamentos e pelos cafezinhos de todos os dias; À Profa. Rosemery Nascimento pela amizade e por todos os sábios conselhos e ao professor Ronaldo Lemos, pelo conhecimento compartilhado comigo;

Ao Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada, em especial ao Alessandro Leite, Pablio Henrique, Glayce Valente, Darilena Porfírio, Laís Aguiar, Igor Barreto, Priscila Gozzi, Rayara Silva, Paulo Ronny e Rose Norat. Aos meus grandes amigos, Juliana Carolina, Alan Silva, Gisele Marques, Daniela Vieira, Yury Reis, Carol Resque e Luiz Cristo. Aos meus ‘bolsistas’ Adriane Marques, Douglas Barros, Mário Failache e Matheus Nonato. À Amanda Medeiros e a equipe de natação Feras Aquáticas, por todo o incentivo e momentos felizes durante as competições de natação;

Ao meu noivo Julio Richards, a pessoa que sempre esteve ao meu lado, que me salvou dos meus pensamentos, das minhas crises de ansiedade e me incentivou a terminar esse trabalho mesmo quando eu quis desistir de tudo;

À minha família, por estar sempre ao meu lado e por me incentivar a ir atrás dos meus sonhos.

“It is only with the heart that one can see rightly;
what is essential is invisible to the eye”
The Little Prince

RESUMO

Pesquisas recentes desenvolvidas na região de Bonito-Ourém proporcionaram a descoberta de 4 alvos, denominados de Serrotinho, Serrote, Tracua e Caeté, cuja avaliação da composição química preliminar indicou uma potencialidade econômica para fósforo, semelhante ao depósito fosfático de Bonito. Todavia, novas observações e estudos químicos envolvendo cálculos estequiométricos foram realizados e apontaram para possíveis variações mineralógicas em dois dos quatro alvos em relação a mineralogia predominantemente crandallítica do depósito de Bonito. O presente estudo teve como principal objetivo investigar a geologia, mineralogia e geoquímica desses novos depósitos, visando identificar possíveis variações destes depósitos com os do depósito de Bonito e da região do Gurupi, além de investigar se estes depósitos se enquadrariam no modelo genético da grande maioria dos depósitos de fosfatos de alumínio da região Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão. A metodologia consistiu na visita técnica, descrição de testemunhos e coletas de amostras, seguidos pelas atividades analíticas/laboratoriais, como microscopia óptica, difração de raios x e análises químicas em rocha total. Em geral, os alvos Serrotinho, Serrote, Tracua e Caeté constituem pequenos morros isolados, com altitudes variando entre 50 a 90 m, sustentados por formações lateríticas maduras, completos e/ou truncados e com pelo menos um horizonte enriquecido em fosfatos de alumínio. Os perfis não ultrapassam a espessura de 9 m e estão frequentemente estruturados em quatro horizontes, constituídos da base para o topo por um horizonte saprolítico, um horizonte argiloso, um horizonte aluminoso fosfático e um horizonte ferroaluminoso fosfático. A mineralogia e a distribuição dos minerais nos perfis são horizontes-dependentes e similares entre os perfis investigados. Em Serrotinho e Serrote os fosfatos predominantes pertencem a série da crandallita-goyazita e da woodhouseíta-svanbergita, além de wardita subordinada. Já em Tracua há o predomínio da augelita e em Caeté predominam a augelita junto da variscita. Em Tracua e Caeté, além dos fosfatos, há a presença de gibbsita que compõe a mineralogia principal da crosta aluminosa fosfática dos perfis. A partir dos resultados, pode-se constatar que os depósitos de Serrotinho, Serrote, Tracua e Caeté guardam muitas semelhanças entre si e com os depósitos e ocorrências de fosfatos lateríticos da região do Gurupi, em especial com Sapucaia e Boa Vista. Entende-se que Serrotinho e Serrote derivaram da mesma sequência sedimentar aluminossilicatada dos depósitos de Sapucaia, Boa Vista, enquanto Tracua e Caeté podem ter sido desenvolvidas sobre sequências metassedimentares enriquecidas em fosfatos, semelhante aos depósitos de Pirocaua e Cansa Perna na região do Cinturão Gurupi.

Palavras-chave: lateritização na Amazônia; depósitos minerais; fertilizantes fosfatados.

ABSTRACT

Recent research carried out in the Bonito-Ourém region provided the discovery of four new targets, called Caeté, Tracuá, Serrote and Serrotinho, whose preliminary chemical composition evaluation indicated an economic potential for phosphorus, like the Bonito phosphate deposit. However, new specifications and chemical studies involving stoichiometric calculations were carried out and pointed to mineralogical variations in two of the four targets in relation to the Bonito deposit mineralogy, mainly crandallitic. The main objective of this present study is to investigate the geology, mineralogy, and geochemistry of these new deposits, aiming to identify possible variations of these deposits with those of the Bonito deposit and of the Gurupi region, in addition to investigating whether these deposits would fit the genetic model of the great majority of aluminum phosphate deposits in the Northeast of Pará and Northwest of Maranhão. The methodology consisted of a technical visit, description of cores and sample collection, followed by analytical/laboratory activities, such as optical microscopy, x-ray diffraction and whole rock chemical analysis. In general, the targets Serrotinho, Serrote, Tracuá and Caeté are small and isolated hills, with altitudes ranging from 50 to 90 m. They were developed over mature lateritic formations, complete and/or truncated, with at least one horizon enriched in aluminum phosphates. The profiles have a maximum thickness of 9 m and are often structured in four horizons, composed from the base to the top by a saprolitic horizon, a clayey horizon, an aluminous phosphatic horizon and a ferroaluminous phosphatic horizon. The mineralogy and distribution of minerals in the profiles are horizon-dependent and very similar among the investigated profiles. In Serrotinho and Serrote, the predominant phosphates are crandallite-goyazite-woodhouseite-svanbergite and wardite, while in Tracuá and Caeté augelite predominates and only in Caeté the presence of variscite was observed. In addition to augelite, gibbsite compose the main mineralogy of the phosphate aluminous crust of Tracuá and Caeté profiles. From the results, it turns out that the Serrotinho, Serrote, Tracuá and Caeté deposits have many similarities with each other and with the deposits and occurrences of lateritic phosphates in the Gurupi region, especially with Sapucaia and Boa Vista. It is understood that Sapucaia, Boa Vista, Serrotinho and Serrote derived from a similar aluminosilicate sequence, while Tracuá and Caeté may have been developed on phosphate-enriched metasedimentary sequences, similar to the Pirocaua and Cansa Perna deposits in the Gurupi Belt region.

Keyword: lateritization in the Amazon; mineral deposits; phosphate fertilizers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Localização dos depósitos e ocorrências de fosfatos de alumínio no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, com destaque para as ocorrências e depósitos da região de Bonito-Ourém, no estado do Pará, objetivo deste trabalho.. 3
- Figura 2 - Mapa de relevo da região de Bonito-Ourém, gerado a partir do modelo digital de elevação, com destaque para os depósitos de Bonito (1- Sapucaia e 2- Boa Vista) e para os alvos deste estudo (3- Serrotinho, 4- Serrote, 5- Tracua e 6- Caeté)..... 4
- Figura 3 - Mapa geológico simplificado da área de estudo, com a localização do depósito de Bonito (1 - Sapucaia e 2 - Boa Vista), dos quatro alvos deste estudo (3- Serrotinho, 4- Serrote, 5- Tracua e 6- Caeté) e dos perfis de 7- Cansa Perna e 8- Jandiá 11
- Figura 4 - Localização e aspectos geomorfológicos dos morros estabelecidos sobre perfis lateríticos aluminofosfáticos. A) Seção esquemática dos morros de Serrotinho e Serrote. B) Seção esquemática dos perfis de Tracua e Caeté. C) Configuração simplificada dos perfis lateríticos fosfáticos encontrados em 1) Serrotinho, 2) Serrote, 3) Tracua e 4) Caeté. 18
- Figura 5 - Representação dos perfis lateríticos e suas respectivas litologias observadas a partir de furos de sondagem. Amostras dos horizontes: A) SRO-HS; B) SRO-HÁ; C) SRO-HF; D) SRT-HF; E) transição entre SRT-HF e SRT-HFF F) SRT-HFF G) TRD-HA H) TRD-HF I) TRD-HFF J) CTD-HA K) CTD-HF L) CTD-HFF. 21
- Figura 6 - Distribuição da mineralogia ao longo dos perfis relacionando os horizontes descritos com a mineralogia acusada pela difração e raio x 24
- Figura 7 - Amostras representativas das crostas fosfática e ferrofosfática encontradas em Serrotinho e Serrote 26
- Figura 8 - Amostras representativas das crostas fosfáticas e ferrofosfáticas de Tracua e Caeté. 27
- Figura 9 - Distribuição das concentrações dos elementos químicos mais abundantes (maiores) ao longo dos perfis lateríticos de Serrotinho, Serrote, Tracua e Caeté..... 31
- Figura 10 - Diagramas ternários com as composições de P_2O_5 - Al_2O_3 -($CaO + Na_2O + SrO$), CaO - SrO - SO_3 , SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 e P_2O_5 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 , ressaltando a assinatura química e associações geoquímicas entre os perfis e entre as crostas fosfáticas

(verde) e ferroaluminosa fosfática (vermelhas) desse estudo.....	35
Figura 11 - Análise de agrupamento dos elementos químicos mostrando as relações entre as crostas fosfáticas e ferrofosfáticas analisadas.....	36
Figura 12 - Diagramas de dispersão com as principais afinidades geoquímicas observadas a partir das correlações positivas e negativas entre os elementos analisados.....	38
Figura 13 - Padrão de distribuição dos elementos maiores (A) e menores (B) normalizados em relação a Crosta Continental Superior (Upper Continental Crust)	39
Figura 14 - Normalização dos elementos terras raras (ETR) dos horizontes em relação (A) aos valores da Crosta Continental Superior/UCC de Rudnick & Gao (2014); e B) em relação aos valores de Condritos (Chondrites) de Evensen <i>et al.</i> (1978); C) normalização dos horizontes de Sapucaia em relação aos condritos (Leite, 2014); D) Comparação entre os horizontes de Sapucaia (roxo) com os horizontes desse estudo.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Furos de sondagem descritos e amostrados dos alvos de Serrote (SERR-DH-0024), Serrotinho (SERO-DH-0001), Caeté (CTD-001-19) e Tracuá (TRD-001-19).....	13
Tabela 2 - Composição química dos elementos maiores nos furos de sondagem com a distribuição dos elementos ao longo dos horizontes nos perfis lateríticos e em comparação com a média da crosta continental superior (Upper Continental Crust/UCC1).	29
Tabela 3 - Concentração dos elementos maiores, menores e traços das crostas fosfáticas e ferrofosfáticas de Serrotinho (SRO), Serrote (SRT), Tracuá (TRD) e Caeté (CTD) obtidas pela ALS em comparação com a média da Crosta Continental Superior (Upper Continental Crust/UCC)	32

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 LOCALIZAÇÃO DOS DEPÓSITOS INVESTIGADOS	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo geral	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 JUSTIFICATIVA	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 OS FOSFATOS NA REGIÃO NORDESTE DO PARÁ E NOROESTE DO MARANHÃO (REGIÃO DO GURUPI)	6
2.2 OS FOSFATOS NA REGIÃO DE BONITO-OURÉM	7
2.3 A FONTE PRIMÁRIA DO FÓSFORO DOS PERFIS LATERÍTICO-FOSFÁTICOS	8
2.4 CONTEXTO GEOLÓGICO	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1 VISITA TÉCNICA AOS DEPÓSITOS, DESCRIÇÃO DE TESTEMUNHOS E COLETA DE AMOSTRAS	13
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES	13
3.3 ANÁLISES MINERALÓGICAS	14
3.3.1 Microscopia ótica	14
3.3.2 Difração de raios x	14
3.4 ANÁLISES QUÍMICAS TOTAIS	14
3.5 QUANTIFICAÇÃO DAS FASES MINERAIS	15
4 RESULTADOS	17
4.1 GEOLOGIA, ESTRUTURAÇÃO E MINERALOGIA DOS DEPÓSITOS	17

4.1.1 Serrotinho (SRO)	17
4.1.2 Serrote (SER)	18
4.1.3 Tracuá (TRD)	19
4.1.4 Caeté (CTD)	21
4.2 TEXTURA E MICROMORFOLOGIA DAS CROSTAS FOSFÁTICAS E FERROALUMINOFOSFÁTICAS	23
4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	25
4.3.1 Distribuição dos Elementos Químicos Maiores e Menores nos Perfis Lateríticos ..	25
4.3.2 Elementos Traço	28
5 DISCUSSÕES	34
5.1 ASSOCIAÇÕES GEOQUÍMICAS	34
5.2 ELEMENTOS TERRAS RARAS NORMALIZADOS (ETR_N)	37
5.3 PRINCIPAIS CORRELAÇÕES E A ORIGEM DO FÓSFORO	40
6 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é uma das maiores potências agrícolas do mundo e estima-se que até 2050 o país seja responsável por mais de 40% da produção de alimentos no planeta (SAE 2020). O vasto território e a existência de grandes áreas agriculturáveis tornaram o país um dos maiores produtores e exportadores de commodities agrícolas do mundo, junto de países como China e Estados Unidos. No entanto, os solos do Brasil se destacam por uma grande diversidade e em geral por uma baixa fertilidade natural, em que os latossolos e argissolos são os dominantes (Santos 2011) e necessitam de constante manejo e adubação, ou seja, o emprego de fertilizantes.

O Brasil se configura como o quarto maior consumidor de fertilizantes agrícolas do mundo, suplantando apenas pela China, Índia e Estados Unidos, onde aproximadamente 80% dos fertilizantes utilizados no território nacional são oriundos da importação (SAE 2020). Com aproximadamente 8% da demanda mundial, o emprego e a busca por fertilizantes tendem a continuar crescendo pelos próximos 10 anos, devido ao aumento na demanda pela produção de alimentos no país e no mundo (SAE 2020). Essa crescente demanda por fertilizantes, em especial macronutrientes do tipo nitrogênio-fósforo-potássio (NPK), e a baixa produção interna destes insumos tem influenciado historicamente a balança comercial brasileira (Abram *et al.* 2016) e com isso criou-se essa grande dependência da importação destes produtos.

Com o intuito de reduzir essa dependência externa, diversos projetos e planos de ação têm sido desenvolvidos desde 1970, enfocando a busca de novas tecnologias de beneficiamento e reaproveitamento de depósitos já conhecidos, além da busca por novos depósitos dentro do território nacional (SAE 2020). Alguns desses exemplos são a criação dos planos nacionais de fertilizantes em 1974, 1995 e 2010, por parte do Governo Federal (SAE 2020) e a criação do Projeto Fosfato Brasil, em 2008, por parte da CPRM (Abram *et al.* 2011, 2016). Concomitantemente, houve também a ampliação dos estudos sobre remineralização, que consiste na aplicação de pó de rocha em solos visando a nutrição destes (Theodoro *et al.* 2013, Ramos *et al.* 2019), e sobre a utilização de fosfatos de alumínio lateríticos, como fonte alternativa de fósforo (Monteiro & Oliveira 1984, Francisco 2006, Freitas 2009, Silva *et al.* 2015).

No caso dos depósitos de fosfatos de alumínio laterítico, em especial fosfatos do tipo alumínio-fosfato-sulfato (APS), estudos conduzidos em fosforitos da costa oeste africana já

eram empregados como insumos agrícolas (Capedcomme 1953). Diversos depósitos de fosfatos do tipo APS tem sido noticiado mundo afora, em países como China, Rússia, Canadá, Austrália, além do Leste Europeu, Nigéria, dentre outros (Costa *et al.* 2016), alguns destes com potencial para produção de fósforo (Erdosh 1979).

No Brasil, os fosfatos do tipo APS são encontrados principalmente em depósitos supergênicos derivados de rochas sedimentares ou ígneas, nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Goiás e Pará (Costa *et al.* 2016). Grande parte dos depósitos e ocorrências de fosfatos APS estão associados a fosforitos neoproterozoicos e a complexos ultramáficos-alcalinos-carbonatíticos, com exceção da região do Gurupi, no nordeste do Pará (Costa *et al.* 2016). Esta região abriga a maior quantidade de depósitos APS do Brasil, associados a perfis lateríticos desenvolvidos sobre diferentes litotipos, como rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, naturalmente enriquecidos em fosfato (Costa 1980, 1982, 1990, Costa & Reymão 1984, Costa & Araújo 1996, Oliveira 1980, Costa & Souza 1991, Toledo *et al.* 2006, Costa *et al.* 2016) e abriga também a primeira mina de fosfato laterítico da América Latina, no município de Bonito-PA.

Os fosfatos de alumínio lateríticos de Bonito-PA, que incluem os depósitos de Sapucaia e Boa Vista, foram descobertos nos anos de 1980, por meio de pesquisas acadêmicas (Costa M. & Costa W. 1987). Em 2010 foi definida a potencialidade econômica para os fosfatos de Sapucaia e em 2015 foi iniciado o processo de lavra. Novas pesquisas foram desenvolvidas na região, com o intuito de encontrar novos depósitos e aprofundar conhecimentos dos alvos já conhecidos, como Boa Vista. Essas pesquisas proporcionaram a descoberta de 4 novos alvos, denominados de Serrotinho, Serrote, Tracuá e Caeté (Santos 2019), e cuja avaliação da composição química preliminar indicou uma potencialidade econômica para fósforo.

Todavia, novas observações e estudos químicos envolvendo cálculos estequiométricos foram realizados e apontaram para possíveis variações mineralógicas em dois dos quatro alvos em relação a mineralogia predominantemente crandallítica (série crandallita-goyazita-woodhouseíta-svanbergita) do depósito de Bonito, o que pode influenciar diretamente no aproveitamento do minério e na potencialidade econômica destes alvos.

O presente estudo teve como principal objetivo investigar a geologia, mineralogia e geoquímica desses novos depósitos, visando identificar possíveis variações destes depósitos com os do depósito de Bonito e os da região do Gurupi, além de investigar se estes depósitos

se enquadrariam no modelo genético da grande maioria dos depósitos de fosfatos de alumínio da região Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão, notavelmente de origem laterítica (Costa M. & Costa W. 1987, Costa *et al.* 1991, Costa *et al.* 2016).

1.1 LOCALIZAÇÃO DOS DEPÓSITOS INVESTIGADOS

A área de estudo está localizada na região nordeste do estado do Pará (Fig. 1), nos municípios de Bonito (alvos Serrotinho e Serrote) e Ourém (Tracuá e Caeté). Os quatro alvos, (Fig. 2) estudados apresentam as seguintes coordenadas geográficas: **Serrote** ($1^{\circ}20'23.6''\text{S}$ / $47^{\circ}21'13.5''\text{W}$), **Serrotinho** ($1^{\circ}20'28.7''\text{S}$ / $47^{\circ}22'16.6''\text{W}$), **Caeté** ($1^{\circ}24'28.7''\text{S}$ / $47^{\circ}06'38.7''\text{W}$) e **Tracuá** ($1^{\circ}25'02.1''\text{S}$ / $47^{\circ}07'43.6''\text{W}$).

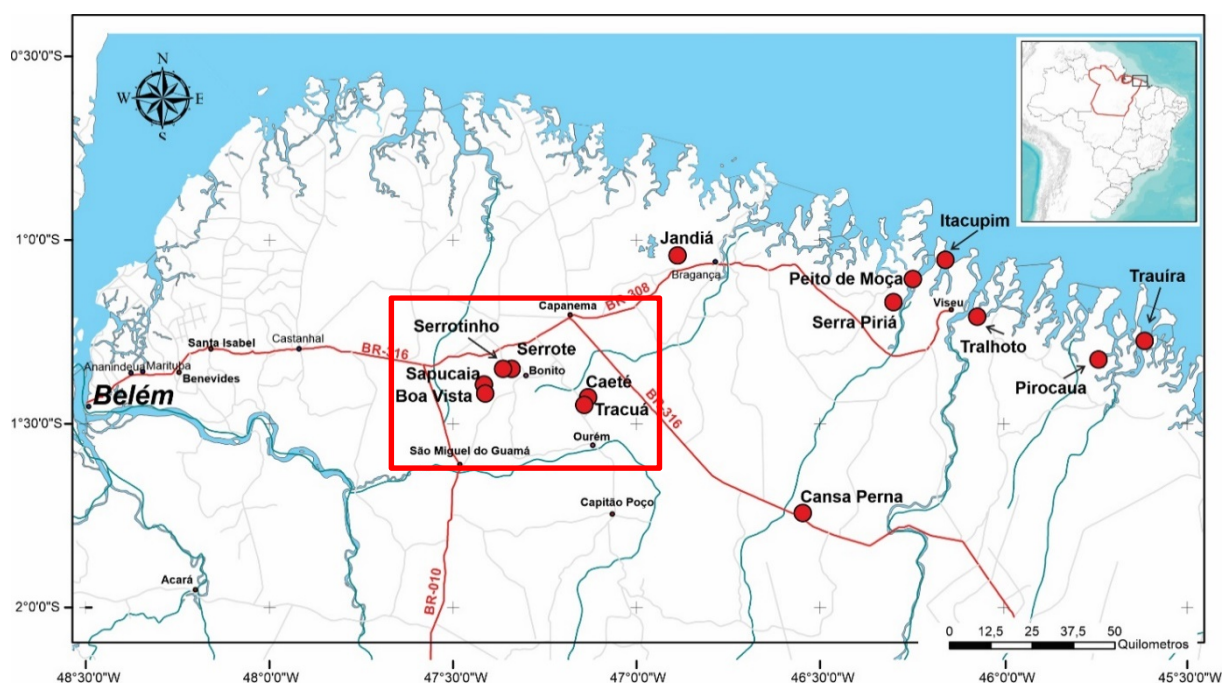


Figura 1 - Localização dos depósitos e ocorrências de fosfatos de alumínio no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, com destaque para as ocorrências e depósitos da região de Bonito-Ourém, no estado do Pará, objetivo deste trabalho. Modificado de Costa *et al.* (2016).

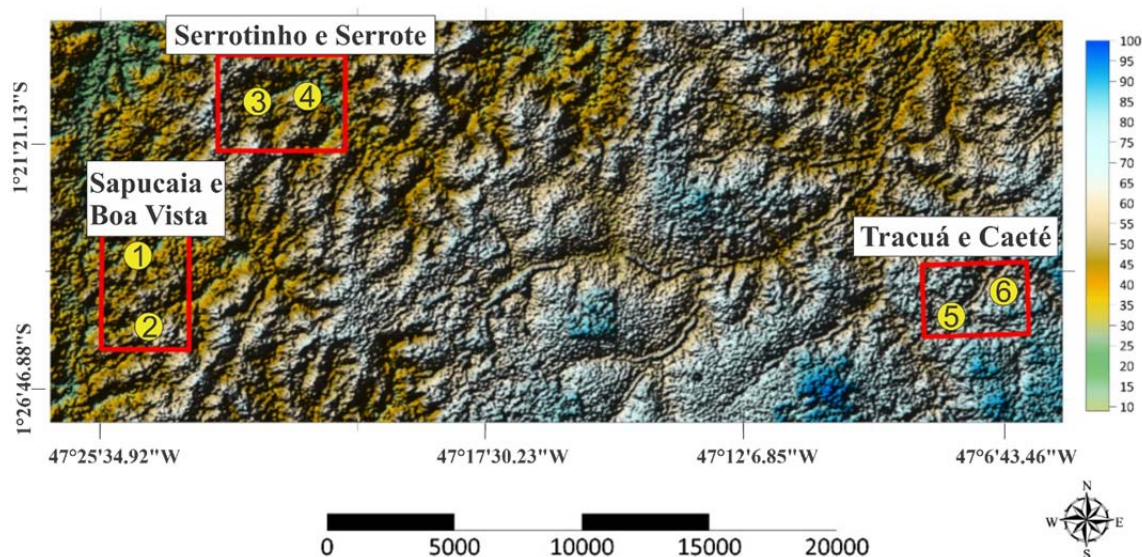


Figura 2 - Mapa de relevo da região de Bonito-Ourém, gerado a partir do modelo digital de elevação, com destaque para os depósitos de Bonito (1- Sapucaia e 2- Boa Vista) e para os alvos deste estudo (3- Serrotinho, 4- Serrote, 5- Tracua e 6- Caeté).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a caracterização geológica, mineralógica e química dos depósitos lateríticos fosfáticos de Serrote, Serrotinho, Caeté e Tracua, com o intuito de esclarecer as relações desses depósitos com os outros depósitos e ocorrências de fosfatos da região do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estabelecer a sucessão laterítica para cada alvo, enfatizando os horizontes portadores de fosfatos de alumínio;
- Identificar a composição mineralógica e química dos fosfatos de interesse e definir suas distribuições ao longo dos perfis lateríticos;
- Identificar padrões geoquímicos ao longo dos perfis de cada depósito e entre estes;
- Realizar comparações e possíveis correlações entre esses novos depósitos com os demais depósitos e ocorrências da região nordeste do Pará e noroeste do Maranhão
- Discutir a possível fonte primária do fósforo;

1.3 JUSTIFICATIVA

Análises químicas preliminares efetuadas pela empresa indicaram algumas variações na composição química e nos teores do minério, além da possibilidade de uma mineralogia

diferente (calculada por estequiometria em relação aos minerais APS), em dois dos quatro depósitos em comparação aos depósitos de Sapucaia e Bonito. Caso essas diferenças sejam comprovadas, elas influenciariam diretamente na potencialidade econômica dos alvos deste estudo e no entendimento sobre os fosfatos lateríticos da região. Portanto, torna-se essencial identificar essas novas informações e elucidar as possíveis relações e/ou diferenças destes depósitos com os demais da região do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OS FOSFATOS NA REGIÃO NORDESTE DO PARÁ E NOROESTE DO MARANHÃO (REGIÃO DO GURUPI)

As principais ocorrências de fosfatos lateríticos na região norte do Brasil estão localizadas na região do Gurupi, nas porções nordeste do Pará e noroeste do Maranhão (Costa *et al.* 2016). Outras ocorrências e depósitos foram encontrados e investigados no noroeste e sudeste do Pará, envolvendo fosfatos primários tipo apatita e secundários tipo apatita e fosfatos de alumínio, como Maicuru no município de Almeirim (Angelica & Costa 1991, Costa *et al.* 1991) e Santana do Araguaia (MbAC 2013), respectivamente; no noroeste do Amazonas, no Morro Seis Lagos em São Gabriel da Cachoeira (Correa & Costa 1997), estes associados a complexos carbonatíticos (Costa *et al.* 1991, Correa & Costa 1997)

Um dos primeiros registros sobre fosfatos na região do Gurupi ocorreu por volta de 1914 na serra do Pirocaua, previamente denominados de “bauxitas fosforosas”. Logo em seguida houve o início dos primeiros estudos sobre essas ocorrências na região, a partir de 1920, focados nos fosfatos recém-descobertos na Ilha de Trauíra. Estes estudos envolveram a análise de campo, descrição petrográfica e caracterização química/mineralógica (Brandt 1932 e Abreu 1937). Alguns anos depois foram publicados os primeiros dados geológicos de superfície e de subsuperfície sobre a serra do Pirocaua por Rabello (1945), Sakamoto & Vargas (1959) e Argentièrre (1971) que contribuíram para a caracterização mineralógica e química dessa ocorrência.

Mapeamentos regionais, visando o reconhecimento dos recursos naturais nacionais, de Costa *et al.* (1975, 1977) abordam os depósitos já conhecidos como Pirocaua e Trauíra e defendem uma contribuição marinha para sua formação, enquanto novas ocorrências, além das mencionadas, como Santa Luzia, Itacupim, Peito de Moça, Tromai, Tralhoto, Jandiá, Serra do Piriá, Barreiras, Pedra Grande do Gurupi e Cumã foram objeto de descobertas e estudos por pesquisadores do Instituto de Geociências da UFPA e da Universidade de Erlangen-Nürnberg. Os fosfatos de alumínio, não lateríticos, de Santa Luzia (Oliveira 1977), seguidos pelos lateríticos de Itacupim (Costa 1980, Costa & Sá 1980, Costa *et al.* 1980, Oliveira & Schwab 1980, Costa 1982, Costa *et al.* 2004 e Toledo *et al.* 2006), Cansa Perna (Costa 1980, 1982), Jandiá (Costa 1980, 1982, 1990), além de novos estudos de detalhe em Pirocaua (Siqueira 1982, Costa & Reymão 1984, Araújo 1994, Costa & Araújo 1996) e Trauíra (Costa 1980, Oliveira 1980). Algumas ocorrências foram posteriormente estudadas, como o caso dos fosfatos das ilhas Peito de Moça, Tromai, Tralhoto, Serra do Jacaré e Pedra

Grande do Gurupi (Costa 1982, Costa & Souza 1991). Esses estudos posteriores demonstraram que esses depósitos se enquadram como de origem laterítica, e em desses depósitos, Itacupim, foi possível identificar a rocha parental (Costa 1980, Costa & Sá 1980, Costa *et al.* 1980, Oliveira 1980).

2.2 OS FOSFATOS NA REGIÃO DE BONITO-OURÉM

No município de Bonito, nordeste do estado do Pará, o primeiro relato sobre fosfatos lateríticos foi realizado por Costa M. & Costa W. (1987) no morro de Sapucaia. Estes autores fizeram a caracterização mineralógica e química dos fosfatos aflorantes e identificaram a presença de crandallita-goyazita-florencita, wardita, hematita, goethita, caulinita, e minerais reliquiais, como anatásio e quartzo. Costa *et al.* (1991), por sua vez, procuraram estudar a assembleia de minerais pesados dessa ocorrência e encontraram a presença de estauroлита, cianita, zircão, rutilo, epídoto e turmalina.

Novos estudos foram conduzidos por Sousa *et al.* (2003) com ênfase nos fosfatos aflorantes de Sapucaia, apresentando algumas informações sobre os fosfatos de Boa Vista, a pouco mais de 2 quilômetros ao sul do primeiro. Estes autores confirmaram a assembleia mineralógica descrita por Costa M. & Costa W. (1987) para Sapucaia e identificaram uma mineralogia semelhante em Boa Vista, com algumas variações composicionais e a presença de wavellita neste último. Um estudo geoquímico dos elementos maiores foi efetuado por estes mesmos autores para as duas ocorrências.

A partir de 2010, o morro de Sapucaia voltou a se tornar alvo de estudos sistemáticos e de detalhe, incluindo dados de subsuperfície, cujos principais resultados foram publicados por Costa *et al.* (2016). Neste trabalho os autores reconheceram 3 horizontes no perfil laterítico sendo eles: horizonte argiloso, crosta aluminosa fosfática-sulfática e crosta ferruginosa aluminosa-fosfática-sulfática. A mineralogia identificada por estes autores é de certo modo semelhante a encontrada por Costa M. & Costa W. (1987) e Sousa *et al.* (2003), no entanto, foi indicada também a presença de woodhouseíta-svanbergita, wardita e, mais localmente, de wavellita, além de zircão, turmalina, estauroлита e rutilo, como acessórios. Costa *et al.* (2016) promoveram ainda um estudo de detalhe sobre a composição e o comportamento químico dos elementos no perfil, incluindo elementos terras raras (ETR) em grande parte contidos na dissertação de mestrado de Leite (2014). Mais recentemente, Costa *et al.* (2018) identificaram a presença de fosfatos verdes, do tipo mitridatita, no topo do perfil de Sapucaia.

2.3 A FONTE PRIMÁRIA DO FÓSFORO DOS PERFIS LATERÍTICO-FOSFÁTICOS.

Os fosfatos da região do Gurupi estão estruturados em perfis lateríticos típicos (Costa 1991), entretanto, ainda há muitas indagações sobre a rocha-mãe desses perfis e sobre a origem do fósforo para essas ocorrências, com exceção de Itacupim, onde a rocha mãe, um apatita hornblendito, foi identificada e descrita (Costa *et al.* 1980, Oliveira 1980, Oliveira & Schwab 1980).

Com os estudos efetuados na região, diversas hipóteses para a origem do fósforo foram levantadas. Uma das primeiras hipóteses foi proposta por Brandt (1932) para a ilha de Trauíra que reconheceu uma ambiência laterítica, e que tardiamente foi alterada por guanos (excrementos de aves) depositados sobre lateritos bauxíticos e ferruginosos. Essa proposta foi adotada por diversos autores como Abreu (1937), Rabello (1945), Sakamoto & Vargas (1956) e Argentièrre (1971).

Costa *et al.* (1977) acompanharam essa linha de raciocínio, mas sugeriram que o fósforo primário era oriundo da deposição de sedimentos fosfáticos em ambiente marinho raso, contrapondo a origem a partir de guanos (origem biogênica) proposta por Brandt (1932).

Para os fosfatos de Santa Luzia, Oliveira (1977) propôs uma remobilização do fósforo nas rochas do Grupo Gurupi, causada por hidrotermalismo, e com posterior precipitação em veios e fraturas. Esta ocorrência em Santa Luzia é discutida por Costa (1980) que confirmou o caráter singular desta ocorrência e sua associação com fluidos hidrotermais.

Ao estudar e fazer comparações entre as ocorrências de Cansa Perna, Jandiá, Itacupim, Pirocaua e Trauíra, Costa (1980) propôs uma origem laterítica sem a contribuição externa de material fosfático, rebatendo os pensamentos anteriores e demonstrando que a origem dos fosfatos estava ligada ao intemperismo de uma rocha-mãe naturalmente rica em fósforo, como foi constatado na ilha de Itacupim. O autor conclui ainda que as rochas-mãe dos lateritos fosfáticos da região do Gurupi apresentam diferentes tipos litológicos, à exemplo: rochas ígneas (Trauíra e Itacupim), sedimentares (Jandiá) e metamórficas (Cansa Perna, Pirocaua e Santa Luzia). Oliveira & Schwab (1980), ao estudar a ilha de Itacupim, argumentaram a favor da concentração de fósforo a partir da alteração supergênica, após constatarem a presença de um saprólito desenvolvido sobre um apatita-hornblendito. Pesquisas posteriores efetuadas por Costa & Sá (1980), Oliveira (1980), Costa (1982, 1984, 1990, 1991, 1997) e Schwab *et al.* (1987) seguiram essa mesma linha de pensamento.

Para os fosfatos lateríticos de Bonito, em especial os de Sapucaia, Costa M. & Costa

W. (1987) e Costa *et al.* (2016) sugerem uma origem laterítica a partir sedimentos enriquecidos em fósforo, semelhante ao de Jandiá. Para corroborar sua teoria, estes autores fizeram diversas comparações entre a composição química e a distribuição de elementos terras raras dessa ocorrência com as rochas da região.

A comparação da assembleia de minerais pesados de Sapucaia, efetuada por Costa *et al.* (1991), permitiu o reconhecimento de uma forte semelhança desta ocorrência com os estratos terciários da Formação Pirabas e do Grupo Barreiras. Tal semelhança induziu os autores a sugerir uma mesma área fonte para os sedimentos que viriam a ser a rocha-mãe do perfil de Sapucaia e para os sedimentos da Formação Pirabas e Barreiras.

Gonçalves & Kotschoubey (2001), ao reavaliar os fosfatos de Jandiá, trouxeram novamente a hipótese de uma origem externa para o fósforo. Para estes autores, a origem do fósforo esteve ligada à deposição de fosforitos sobre um laterito bauxítico, com alteração epigenética e enriquecimento em fósforo. Seus argumentos foram baseados na proximidade destas ocorrências com rochas graníticas ricas em muscovita, a exemplo da suíte Tracuateua aflorante nas proximidades de Jandiá, e na extensa cobertura bauxítica (Província Bauxítica de Paragominas) desenvolvida ao sul dessa ocorrência. Eles mencionam ainda uma provável associação dos fosforitos com a deposição da Formação Pirabas.

De modo semelhante, Sousa *et al.* (2003), por meio de projetos de desenvolvimento tecnológico e aproveitamento de insumos da região do Gurupi, buscaram rever a origem dos fosfatos de Sapucaia e de Boa Vista. Eles adotaram a teoria de Gonçalves & Kotschoubey (2001), com alteração epigenética de fosforitos da Formação Pirabas depositados sobre lateritos bauxíticos. Seus argumentos são fundamentados principalmente em relações de campo e nas composições mineralógica e química desses depósitos. Todavia, estes mesmos autores não descartam totalmente a possibilidade de uma rocha-mãe de origem ígnea enriquecida fósforo, tal como ocorre em Maicuru e Seis Lagos.

Os trabalhos mais recentes executados no município de Bonito (Costa *et al.* 2016) associaram o depósito de Sapucaia ao depósito de Jandiá, considerando para ambos uma rocha-mãe de origem sedimentar. Para esses autores, o depósito de Sapucaia apresenta fortes evidências de uma origem a partir de rochas ricas em argilominerais e em minerais de fosfato de cálcio sedimentar (fosforitos) (Costa *et al.* 2016). Entretanto, os autores sugerem que esses sedimentos estão ligados a estratos mais antigos e provavelmente paleozoicos (Formação Pimenteiras) da Bacia do Parnaíba.

2.4 CONTEXTO GEOLÓGICO

A geologia da região de estudo é formada por rochas de idade pré-cambrianas, do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi, rochas paleozoicas da Bacia do Parnaíba/Grajaú, rochas Terciárias das Formações Pirabas e Barreiras e sedimentos inconsolidados, de idade Quaternária/Recente (Fig. 3).

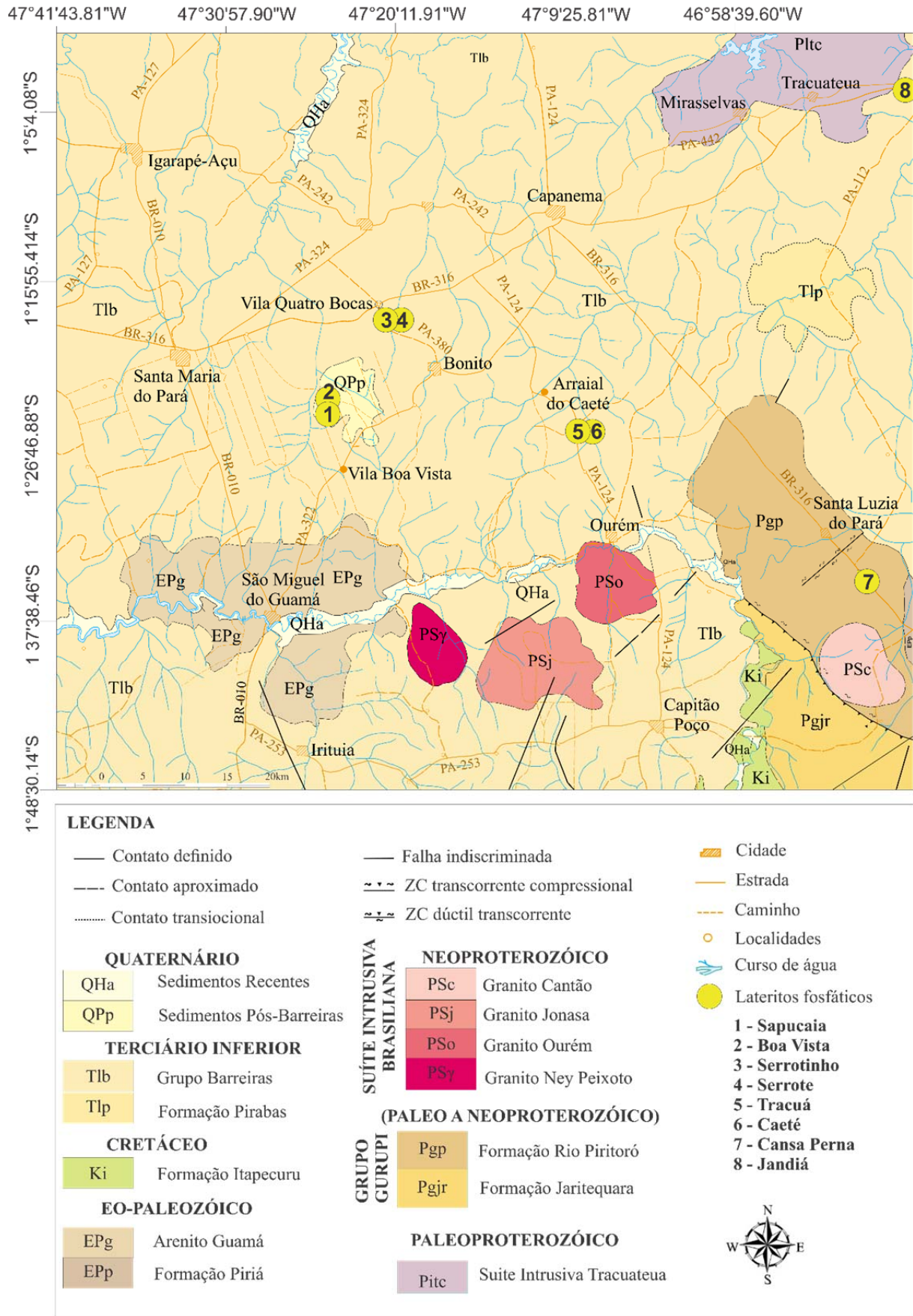


Figura 3 - Mapa geológico simplificado da área de estudo, com a localização do depósito de Bonito (1 - Sapucaia e 2 - Boa Vista), dos quatro alvos deste estudo (3- Serrotonho, 4- Serrote, 5- Tracua e 6- Caeté) e dos perfis de 7- Cansa Perna e 8- Jandiá. Fonte: Modificado de Costa & Ricci (2000), com informações de Costa *et al.* (2016).

O Cráton São Luís na região de estudo é representado pela Suíte Intrusiva Tracuateua, que engloba os corpos granitoides Tracuateua, Mirasselas e Tauari, de idade paleoproterozoica e composição peraluminosa, enriquecidos em mica (Klein & Moura 2003).

O Cinturão Gurupi na área de estudo é representado pelas do Grupo Gurupi, pela suíte alcalina Boca Nova e pelos granitoides Ney Peixoto, Ourém, Jonasa, Japiim e Cantão (Ricci & Costa 2000, Klein & Moura 2003, Klein *et al.* 2020). O Grupo Gurupi abriga uma sequência metavulcanossedimentar, de idade Paleo a Neoproterozoica, de grau metamórfico muito baixo (anquimetamorfismo) a alto (fácies anfibolito) e dividido nas Formações Rio Piritoró, Jaritequara e Vila Cristal (Klein & Moura 2003, Klein *et al.* 2020). A suíte alcalina Boca Nova é constituída por um nefelina sienito deformado, com bandamento gnáissico e migmatização localizada, com idade variando do mesoproterozoico ao neoproterozoico. Os granitoides Ney Peixoto, Ourém, Jonasa, Japiim são de idade mesoproterozóicas a neoproterozóicas e são constituídos por monzogranitos, sienogranitos e granodioritos, de composição peraluminosa, ricos em duas micas (biotita e muscovita), enquanto Cantão é constituído por biotita monzogranito (Klein & Moura 2003). paleoproterozoica e composição peraluminosa, enriquecidos em mica (Klein & Moura 2003).

Os estratos paleozoicos são representados pelo arenito Guamá, de idade Siluriana e depositado em ambiente marinho (Oliveira & Truckenbrodt 2019), e pela Formação Itapecuru, de idade Cretácea, constituída por arenitos siltito, conglomerados e grauvacas, depositada em ambiente continental (Ricci & Costa 2000). paleoproterozoica e composição peraluminosa, enriquecidos em mica (Klein & Moura 2003).

As formações Pirabas (Oligo-Mioceno) e Barreiras (Mioceno) constituem uma sequência sedimentar de ambiente marinho a transicional geneticamente relacionada (Rossetti & Góes 2004, Rossetti *et al.* 2013). A Formação Pirabas é constituída por rochas carbonáticas, depositadas em ambiente de plataforma rasa, enquanto a Formação Barreiras é constituída por rochas siliciclásticas depositadas em ambiente continental a transicional, com influência de processos de maré (Rossetti 2001, Rossetti & Góes 2004, Rossetti 2006, Rossetti *et al.* 2013). paleoproterozoica e composição peraluminosa, enriquecidos em mica (Klein & Moura 2003).

Por fim, os sedimentos recentes são representados por depósitos aluviais, depositados em canais, além de latossolos amarelos, com espodossolos ocorrendo localmente (Ricci & Costa 2000). paleoproterozoica e composição peraluminosa, enriquecidos em mica (Klein & Moura 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 VISITA TÉCNICA AOS DEPÓSITOS, DESCRIÇÃO DE TESTEMUNHOS E COLETA DE AMOSTRAS

Esta etapa foi realizada entre os dias 19 e 22 de novembro de 2019 e consistiu na visita técnica aos alvos de estudo, sob coordenação do geólogo de exploração da então Phosfaz Fertilizantes, para reconhecimento, discussão geológica e a coleta de amostras *in situ*. Nesse mesmo período, visitou-se a casa de testemunhos da empresa e realizou-se a descrição de 8 testemunhos de sondagem com a coletas de amostras representativas de cada alvo (tabela 1) a partir desses furos de sondagem. No total, foram coletadas 83 amostras, sendo 67 amostras de testemunho de sondagem. Além destas, foram coletadas 16 amostras de mão durante as atividades no campo. Todas as amostras, coletadas em campo e nos furos de sondagem, foram fotografados, com vista geral e em detalhe, com o auxílio de uma câmera digital automática Sony Cyber-shot, 12.1 Mp e uma escala de bolso apropriada. Para a coleta de amostras, utilizou-se um martelo petrográfico e sacos plásticos de 5 Kg e de 20 kg para o acondicionamento das amostras de pequeno a médio porte e um caixote de plástico para o transporte de todas as amostras.

Tabela 1 - Furos de sondagem descritos e amostrados dos alvos de Serrote (SERR-DH-0024), Serrotinho (SERO-DH-0001), Caeté (CTD-001-19) e Tracuí (TRD-001-19).

Furo de Sondagem	Coordenadas W	Coordenadas S	Altitude (m)	Profundidade (m)	Zona	Uso
SERR-DH-0024	47°21'13,47"	01°20'02,58"	63,98	50,2	23 M	Amostragem
SERO-DH-0001	47°22'16,61"	01°20'28,69"	50,87	17,65	23 M	Amostragem
CTD-001-19	47°06'38,65"	01°24'28,66"	84,26	40,3	23 M	Amostragem
TRD-001-19	47°07'43,62"	01°25'02,05"	86,03	10,7	23 M	Amostragem

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES

As amostras foram descritas com o auxílio de uma lupa binocular de aumento de 50x e um canivete, além de uma câmera digital automática Sony Cyber-shot, 12.1 Mp e uma escala de bolso apropriada. Em seguida, selecionou-se amostras representativas para confecção de lâminas delgadas e para as análises laboratoriais. A preparação das amostras para análises laboratoriais envolveu a pulverização das amostras representativas, com um almofariz e um pistilo de ágata, e posterior acondicionamento destas em sacos plásticos de 50 ml.

3.3 ANÁLISES MINERALÓGICAS

3.3.1 Microscopia ótica

No total foram confeccionadas 32 lâminas delgadas, as quais foram analisadas por microscopia ótica enfatizando feições texturais e a identificação da mineralogia a partir das propriedades óticas de cada mineral, a medida do possível. Para essa análise empregou-se o microscópio petrográfico Zeiss Axio Scope.A1 junto do microscópio petrográfico Zeiss Axio Lab.A1, com câmera AxioCam ERc 5s acoplada, para a coleta de imagens das lâminas, ambos pertencentes ao Laboratório de Petrografia – Ensino Graduação.

3.3.2 Difração de raios x

Para a identificação mineralógica em suporte a petrografia ótica, empregou-se o método difração de raios x (DRX), pelo método do pó, com difratômetro Bruker D2 PHASER, com ânodo de Cu, operando a 300 W (30 KV e 10mA) de potência e intervalo medida de 5 a 75° 2 θ . Para a interpretação dos difratogramas, comparou-se os resultados dos picos com as informações das fichas do banco de dados do *International Center on Diffraction Data* (ICDD), com o auxílio do *Software X'pert Highscore Plus*, versão 3.0, da PANalytical. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará,

3.4 ANÁLISES QUÍMICAS TOTAIS

A Empresa Phosfaz disponibilizou resultados analíticos parciais para as amostras dos furos selecionados nesse trabalho, em um intervalo de 0,3 m para os testemunhos de sondagem de Boa Vista e de 1,0 m para Serrote, Serrotinho, Caeté e Tracuí. Nos alvos Serrote, Serrotinho, Caeté e Tracuí foram disponibilizados das análises de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, TiO₂, P₂O₅, Na₂O, K₂O, MnO e Perda ao fogo. Esses elementos químicos foram analisados por Fluorescência de Raio X (FRX) e a perda ao fogo foi obtida por gravimetria. Essas análises foram realizadas nos laboratórios da SGS Geosol, no Brasil.

Com base nesses dados foram selecionadas 7 amostras representativas dos horizontes fosfáticos (crostas fosfáticas e ferrofosfáticas) de cada alvo para a análise química multi-elementar mais ampla, incluindo ainda os elementos terras raras. Essas análises foram realizadas nos laboratórios da ALS no Peru. Os óxidos dos elementos maiores e menores (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, TiO₂, P₂O₅, Na₂O, K₂O, MnO) foram determinados por ICP-

OES após digestão multiácida ($\text{HCl}+\text{HNO}_3+\text{HF}+\text{HClO}_4$). A perda ao fogo foi determinada por calcinação a 1000° e por gravimetria. Os elementos traços, incluindo os elementos terras raras (Ba, Cr, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, As, Bi, Hg, In, Ga, Ge, Cs, Hf, Nb, Re, Sb, Se, Te, Tl, Ag, Cd, Co, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Zn, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Rb, Sc e Y) foram determinados por ICP-MS após fusão com borato de lítio (LiBO_2) e as concentrações e C total e S total foram determinadas pelo sistema LECO.

3.5 QUANTIFICAÇÃO DAS FASES MINERAIS

A quantificação das fases minerais foi realizada por meio da estequiometria, a partir das análises químicas. O método de cálculo é baseado no modelo proposto por Costa *et al.* (2016) para as amostras de fosfatos do tipo APS de Sapucaia. Algumas modificações foram realizadas devido a limitação de analitos analisados e visando contemplar não apenas as amostras de fosfatos APS, mas também os do tipo simples.

Na metodologia de Costa *et al.* (2016), os teores de SO_3 são calculados como pertencentes à série woodhouseíta-svanbergita e os teores remanescentes de CaO e SrO são usados como base para a quantificação de crandallita e goyazita, respectivamente. Os teores remanescentes de $\text{P}_2\text{O}_5+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{H}_2\text{O}$ mais Na₂O foram usados para quantificar a série wardita-millisita. Em seguida, utilizou-se os valores remanescentes de $\text{P}_2\text{O}_5+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{H}_2\text{O}$ e os teores de ETR+Ba para calcular a quantidade de florencita-gorceixita. O $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{H}_2\text{O}$ remanescente foram associados aos teores totais de K_2O e SiO_2 para a quantificação da muscovita. Após isso, os valores remanescentes de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{H}_2\text{O}$ foram empregados à quantificação da caulinita. Os teores remanescentes de SiO_2 são contabilizados como quartzo. Os teores totais de Fe_2O_3 e TiO_2 são calculados como hematita/goethita e anatásio, respectivamente.

Neste trabalho, para amostras cuja mineralogia era dominada por minerais APS, calculou-se inicialmente os teores de $\text{Na}_2\text{O}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{H}_2\text{O}$ como pertencentes à série wardita, os teores de $\text{P}_2\text{O}_5+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{H}_2\text{O}$ remanescentes associados aos teores de CaO foram utilizados para calcular os teores da série crandallita-goyazita e os teores de $\text{P}_2\text{O}_5+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{H}_2\text{O}$ restantes foram utilizados para o cálculo da concentração da série woodhouseíta-svanbergita. Para fins de representação gráfica, somou-se os teores de crandallita-goyazita e de woodhouseíta-svanbergita, representados pela solução sólida crandallita-goyazita-woodhouseíta-svanbergita. Para a quantificação da muscovita, caulinita, quartzo, hematita/goethita e anatásio não houve alterações na metodologia proposta por Costa *et al.*

(2016).

Para as amostras com predomínio de fosfatos do tipo simples, devido a identificação de minerais da série da crandallita-woodhouseíta por meio de DRX, empregou-se os teores de $\text{CaO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ como pertencentes a solução sólida crandallita-woodhouseíta. Os teores de $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ remanescentes foram usados para a quantificação da augelita e da variscita. A quantificação da variscita foi realizada com o auxílio da petrografia e de análise semiquantitativa de DRX (posição e intensidade dos picos difratométricos), visto a impossibilidade de individualizar essa fase da augelita a partir de cálculos a partir da composição química em amostra total. Após a quantificação das fases fosfáticas, utiliza-se os teores remanescentes de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ associados aos de K_2O e de SiO_2 para a quantificação da muscovita. O SiO_2 remanescente é dividido por 2 e metade do SiO_2 é somado ao $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ e usado na estrutura da caulinita e o SiO_2 remanescente é calculado como quartzo. Em seguida, utiliza-se o valor excedente de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ no cálculo da gibbsita. Por fim, os teores Fe_2O_3 são usados para quantificar a hematita/goethita e os teores de TiO_2 para o anatásio.

4 RESULTADOS

4.1 GEOLOGIA, ESTRUTURAÇÃO E MINERALOGIA DOS DEPÓSITOS

Os depósitos de Serrotinho, Serrote, Tracuá e Caeté, constituem pequenos morros isolados, íngremes em relação ao relevo regional aplainado e baixo, com altitudes variando entre 50 e 90 m, destacando-se em relação ao relevo dissecado da região (Fig. 4). Os morros foram esculpidos sobre formações (perfis) lateríticas maduras (de acordo com a classificação de Costa 1991) completos e/ou truncados, mas sempre apresentando o horizonte de fosfatos de alumínio e/ou de crosta ferroaluminosafosfática e de fosfatos de alumínio. Todas essas formações estão aflorantes em superfície nestes depósitos, podendo se apresentar parcial ou completamente recobertos por sedimentos recentes e/ou por fragmentos de crosta oriundos dos próprios morros, em suas encostas.

4.1.1 Serrotinho (SRO)

O alvo Serrotinho exibe um morro íngreme de 51 m de altitude sustentado por um perfil laterítico maduro parcialmente truncado ao nível do horizonte de fosfatos de alumínio, aflorando parcialmente em superfície. Os dados de sondagem mostram uma sucessão com 5 m de espessura, tendo na base do furo o horizonte saprolítico (**SRO-HS**), seguido pelo horizonte argiloso (**SRO-HA**), e ao topo a crosta/horizonte fosfático (**SRO-HF**), que próxima a superfície se encontra parcialmente desmantelada.

O **SRO-HS** é composto por argilitos e siltitos brancos a marrons avermelhados, com intercalações de um arenito branco, de granulometria muito fina, parcialmente intemperizados, equivalendo assim ao saprólito. Dominam a caulinita, quartzo e muscovita, além de hematita e goethita mais subordinados. O **SRO-HA**, é dominado por um material argiloso branco (Fig. 4), friável, de composição caulinítica, com grãos de quartzo e palhetas de muscovita subordinados. Nódulos e concreções de fosfatos de alumínio de coloração cinza envolvidos pelo material argiloso branco se fazem presentes e convergem para o horizonte acima, o **SRO-HF**. Este, trata-se de crosta formada predominantemente por fosfatos de alumínio, de cor cinza esbranquiçada (Fig.4), com matizes branco-amarelados. Com mencionado ela se encontra parcialmente desmantelada no topo, quando se apresenta como nódulos e fragmentos em matriz areno-argilosa. Esses nódulos e fragmentos são maciços, mas podem ser subordinadamente microporosos a microcavernosos.

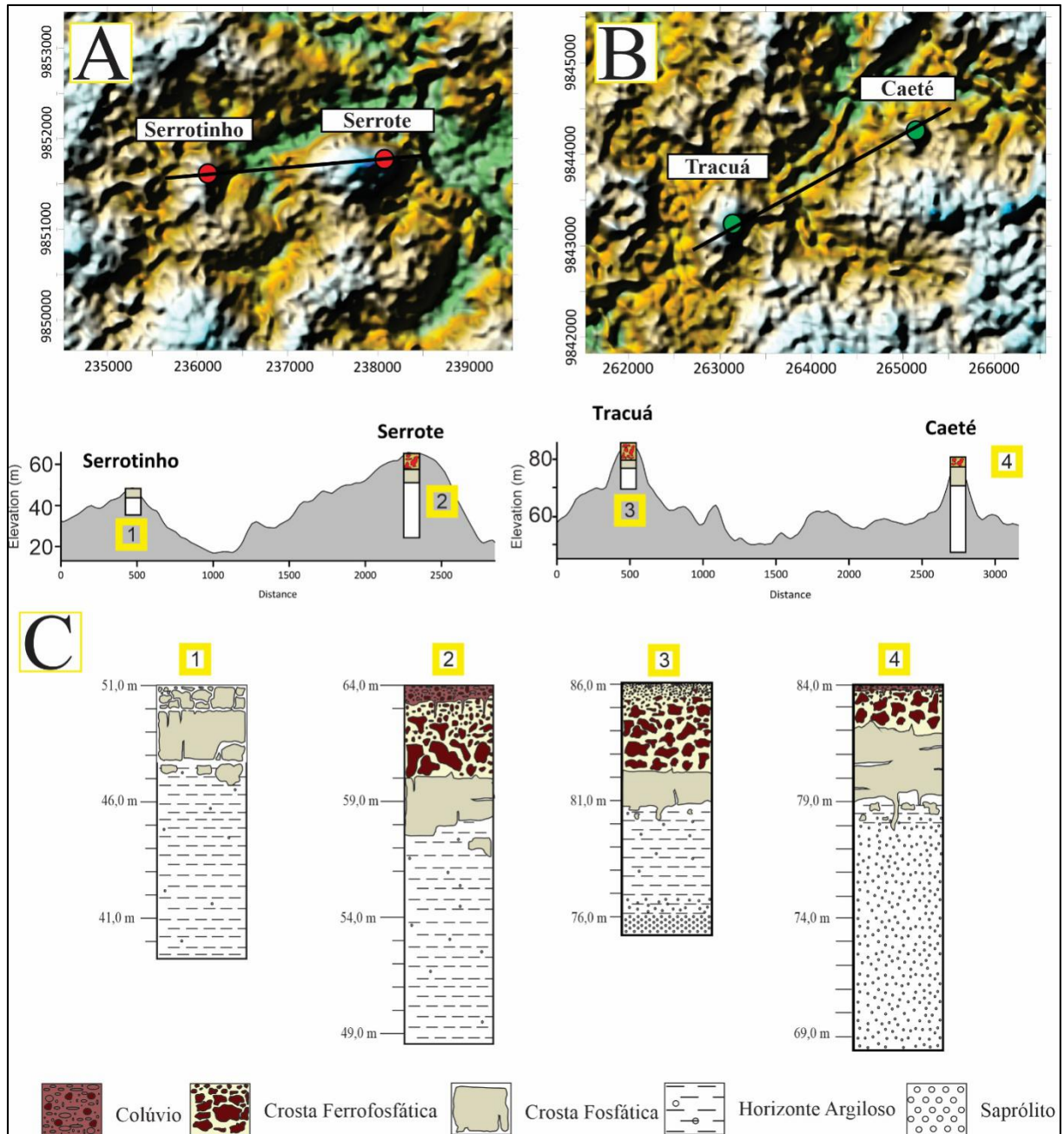


Figura 4 - Localização e aspectos geomorfológicos dos morros estabelecidos sobre perfis lateríticos aluminofosfáticos. A) Seção esquemática dos morros de Serrotonho e Serrote. B) Seção esquemática dos perfis de Tracua e Caeté. C) Configuração simplificada dos perfis lateríticos fosfáticos encontrados em 1) Serrotonho, 2) Serrote, 3) Tracua e 4) Caeté.

4.1.2 Serrote (SER)

O alvo Serrote está localizado a 2 km a leste de Serrotonho (Fig. 5). Também se apresenta como morro íngreme, de 64 m de altitude, sustentado por um perfil laterítico maduro, parcialmente aflorante e recoberto por material arenoso amarelo. Com base no furo de sondagem, com profundidade de 16 m, constatou-se a presença de uma sequência laterítica típica, de 8 m de espessura, constituído da base para o topo, pelo horizonte saprolítico (**SER-HS**), seguido pelo argiloso (**SER-HA**), pela crosta fosfática aluminosa (**SER-HF**) e então

pela crosta ferrofosfática aluminosa (**SER-HFF**), que no seu topo se apresenta parcialmente desmantelado e convergindo para cobertura tipo solo.

O saprólito **SER-HS** está representado por material silto-argiloso, marrom avermelhada a branca, com intercalações arenosas brancas, muito fina, bastante friável. Os constituintes são predominantemente quartzo, caulinita e muscovita, além de hematita e goethita em proporções variáveis, semelhante ao horizonte **SRO-HS** de Serrotonho. O horizonte **SER-HA** também se equivale ao depósito anterior, predominando material argiloso branco, localmente bege, caulínítico, com lentes de material arenoso fino e branco. É dominando por caulinita e exibe muitas palhetas de muscovita e grãos de quartzo na matriz argilosa, além de alguns nódulos de hematita e goethita mais restritos. O contato com a crosta fosfática aluminosa se dá também com a presença de nódulos de material fosfático cinza esbranquiçados dispersos em meio ao material argiloso, como no depósito Serrotonho. O horizonte **SER-HF**, assemelha-se ao horizonte **SRO-HF**, exibindo uma crosta maciça, cinza com porções argilosas brancas e constituídos por fosfatos de alumínio cinza esbranquiçados. A transição para o horizonte acima, a crosta ferrofosfática aluminosa, é marcada pelo aumento na quantidade de nódulos marrom avermelhados, formados principalmente por hematita/goethita. O horizonte **SER-HFF**, embora semelhante a **SER-HF**, apresenta muitos nódulos e pisólitos de hematita/goethita, marrom avermelhados a vermelhos, cimentados por um material fosfático cinza esbranquiçado a amarelado (Fig. 5), definindo uma textura do tipo pele de onça. Algumas cavidades deste horizonte estão revestidas material argiloso branco e/ou por drusas de cristais prismáticos incolores de wavellita.

4.1.3 Tracuá (TRD)

O alvo Tracuá, por sua vez se apresenta como o morro de maior altitude, com 86 m, também estabelecido sobre um perfil laterítico maturo completo e aflorando parcialmente em superfície. Os furos de sondagens atingiram apenas 11 m de profundidade, em que o perfil laterítico apresenta 9 m de espessura. Da base para o topo, como os demais, identifica-se o horizonte saprolítico (**TRD-HS**), o argiloso (**TRD-HA**), o fosfático aluminoso (**TRD-HF**) e o ferrofosfático (**TRD-HFF**), além de uma cobertura composta pelo horizonte ferrofosfático desmantelado, similar ao depósito Serrote.

O **TRD-HS** é também similar aos anteriores, porém mais arenoso e amarelo esbranquiçado, bastante friável, mas ainda com bastante material argiloso. Domina o quartzo, caulinita, goethita e mais subordinadamente hematita. Ao contrário dos anteriores não foi reconhecida a muscovita. O **TRD-HA**, similar ao mesmo horizonte nos demais depósitos, é

composto por caulinita e quartzo, com muscovita subordinada. Cristais de estaurolita foram observados mais restritamente com o auxílio do microscópio ótico. A sua transição para o **TRD-HF** ocorre da mesma forma que nos anteriores, sendo marcada pelo aumento na quantidade de nódulos cinza esbranquiçados de material fosfático, envolvidos por um material argiloso branco e caulinítico. A **TRD-HF** também não diverge das demais, embora apresente com maior frequência porções amarelas e vermelhas, de aspecto maciço, localmente nodular a microcavernoso (Fig. 5), sendo formada por augelita e gibbsita. O contato com a crosta **TRD-HFF** acima é gradual, com aumento no número de nódulos e esferólitos de hematita/goethita, semelhante ao que ocorre em Serrote. Ela apresenta aspecto tipo pele de onça, com nódulos e esferólitos marrons avermelhados a vermelhos de hematita/goethita, cimentados por um material fosfático cinza esbranquiçado a amarelado de augelita, com gibbsita associada. (Fig. 5). Em algumas porções, o material fosfático se apresenta na forma de nódulos brancos amarelados, envolvidos e cimentados por hematita/goethita coloforme. Assim como em Serrote, na TRD-CFF há a presença de cavidades preenchidas por cristais incolores e prismáticos de wavellita e por gibbsita branca, microcristalina.

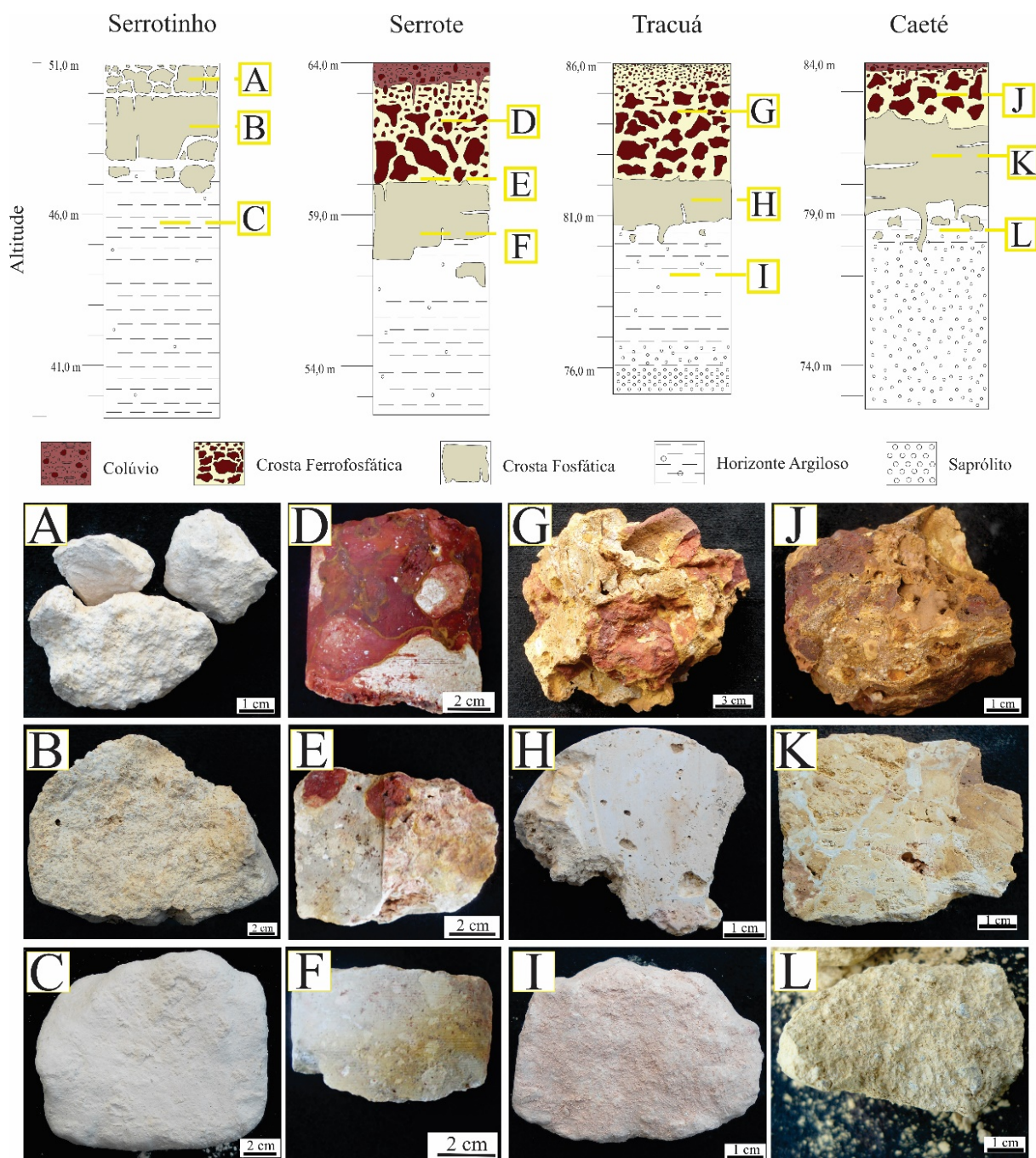


Figura 5 - Representação dos perfis lateríticos e suas respectivas litologias observadas a partir de furos de sondagem. Amostras dos horizontes: A) SRO-HS; B) SRO-HÁ; C) SRO-HF; D) SRT-HF; E) transição entre SRT-HF e SRT-HFF F) SRT-HFF G) TRD-HA H) TRD-HF I) TRD-HFF J) CTD-HA K) CTD-HF L) CTD-HFF.

4.1.4 Caeté (CTD)

O alvo Caeté, localizado a 2,3 km de Tracuá, é semelhante aos outros morros, com altitude de aproximadamente 85 m e sustentado por um perfil laterítico maduro, desenvolvido sobre uma sequência arenoargilosa. Assim como nos demais, a descrição dos furos de sondagem indicou a presença de um perfil laterítico completo, de 6 m de espessura, constituída por um horizonte saprolítico (CTD-HS), um horizonte argiloso (CTD-HA), um

horizonte fosfático (**CTD-HF**) e um horizonte ferrofosfático (**CTD-HFF**).

Semelhante aos outros, o **CTD-HS** deste alvo também é constituído por sequência arenoargilosa, com profundidade superior a 20 m, porém com granulometria mais grosseira em padrão granocrescente ascendente e de cor predominantemente amarela, localmente branca a marrom avermelhada. Nesta sequência predominam quartzo e caulinita, com goethita e muscovita mais restritos. Acima, o **CTD-HA** é semelhante ao dos perfis descritos anteriormente, porém exibe a menor espessura dentre eles, de apenas a 1 m e a maior quantidade de material arenoso associado (Fig. 5). Neste horizonte, predomina caulinita junto do quartzo e a muscovita é mais restrita. Tal qual nos outros perfis, no topo deste horizonte há material fosfático, na forma de nódulos e vênulas de augelita e variscita, em meio ao material caulínico. A **CTD-HF** difere pela sua coloração mais amarelada que as outras (Fig 5). Em termos texturais assemelha-se com as demais, e do ponto de vista mineralógico é mais parecida com Tracuá, composta por augelita e gibbsita, porém com mais ocorrência de variscita. A transição com o horizonte superior não difere dos demais perfis, o mesmo acontece com **CTD-HFF** desse alvo, o qual exibe textura do tipo pele de onça composta por nódulos e esferólitos de hematita/goethita cimentados por augelita, variscita e gibbsita. Esse horizonte exibe também cavidades preenchidas por gibbsita e wavellita, na forma de um material argiloso branco e de cristais prismáticos e incolores, respectivamente.

A distribuição dos minerais nos perfis é horizonte-dependente, uma característica típica de perfis lateríticos, e similar para todos os perfis investigados, como mostra a figura 6. Na base, domínio do saprólito, caulinita e quartzo se destacam, além de hematita/goethita, com muscovita como acessória. Em direção ao horizonte argiloso, a mineralogia se mantém ligeiramente similar, porém com o surgimento de fosfatos de alumínio no topo em todos os depósitos, como crandallita-goyazita, wardita e augelita, refletindo os nódulos de fosfatos. Gibbsita também se faz presente, porém apenas em Tracuá e Caeté. Esses minerais passam a serem dominantes na crosta fosfática aluminosa e na crosta ferroaluminosa-fosfática, com caulinita subordinada. Crandallita-goyazita e wardita predominam em Serrotinho e Serrote, enquanto augelita em Tracuá e Caeté, e variscita apenas em Caeté. A wardita, no entanto, é subordinada em relação a crandallita-goyazita e a woodhouseíta-svanbergita, apresentando uma maior concentração nas porções inferiores das crostas fosfáticas e diminuindo em direção ao topo dos perfis.

A distribuição da variscita ao longo do perfil laterítico em Caeté é marcada pelo aumento na quantidade desse mineral na crosta fosfática em direção a crosta ferrofosfática

(Fig. 6). Esse aumento é acompanhado diretamente pela diminuição no conteúdo de gibbsita nesse mesmo sentido. Hematita é óxido de ferro mais abundante, e claro, domina na crosta ferroaluminosa-fosfática, que não foi encontrada em Serrotinho. A augelita também se faz presente no topo de Serrote, de modo muito subordinado (Fig. 6). As crostas de fosfatos de alumínio e ferroaluminosa-fosfática, quando desmanteladas, além dos minerais iniciais, apresentam maior quantidade de caulinita. Portanto o aspecto marcante entre os horizontes inferiores e os superiores, é a forte diminuição dos teores de caulinita e quartzo e o aumento de fosfatos de alumínio, e ainda de hematita para a crosta superior. A muscovita diminui para o topo, porém palhetas desse mineral ainda são identificáveis nas duas crostas.

4.2 TEXTURA E MICROMORFOLOGIA DAS CROSTAS FOSFÁTICAS E FERROALUMINOFOSFÁTICAS

Conforme já mencionado, nas crostas fosfáticas as principais fases presentes são crandallita-goyazita, woodhouseíta-svanbergita, wardita, variscita e augelita, além de gibbsita e, na crosta ferroaluminosafosfática, a presença expressiva de hematita e goethita. Esses minerais foram identificados principalmente por difração de raios-X (Fig. 6) e posteriormente confirmados por petrografia e pelas análises químicas.

Em Serrotinho e Serrote, a crandallita-goyazita e a woodhouseíta-svanbergita se apresentam de forma criptocristalina e estão intercrescidas pelo cimento fosfático, exibindo uma textura predominantemente maciça, localmente microporoso e, por vezes, coloforme (Fig. 7). A wardita se apresenta como nódulos e/ou fragmentos brechóides, internamente micro a criptocristalinos, em meio ao cimento de crandallita-goyazita e de woodhouseíta-svanbergita (Fig. 7). Mais localmente na crosta fosfática aluminosa, a wardita aparece envolvendo algumas porções de material argiloso caulínico.

Em Tracuá e Caeté, não foi possível identificar a crandallita-goyazita em lâmina delgada, mas sua presença foi acusada pelo DRX e análises químicas. Nesses dois perfis, a augelita e a gibbsita constituem a mineralogia predominante na crosta fosfática (Fig. 6). A augelita constitui tanto a massa dos nódulos/esferólitos quanto do cimento presente na crosta. Em lâmina, ela se apresenta de forma criptocristalina, incolor e pseudoisotrópica, exibindo internamente uma textura maciça e localmente coloforme (Fig. 8). A gibbsita é branca em amostra de mão e incolor em lâmina delgada. Ela se apresenta de forma maciça ou como agregados cristalinos micrométricos, de hábito tabular.

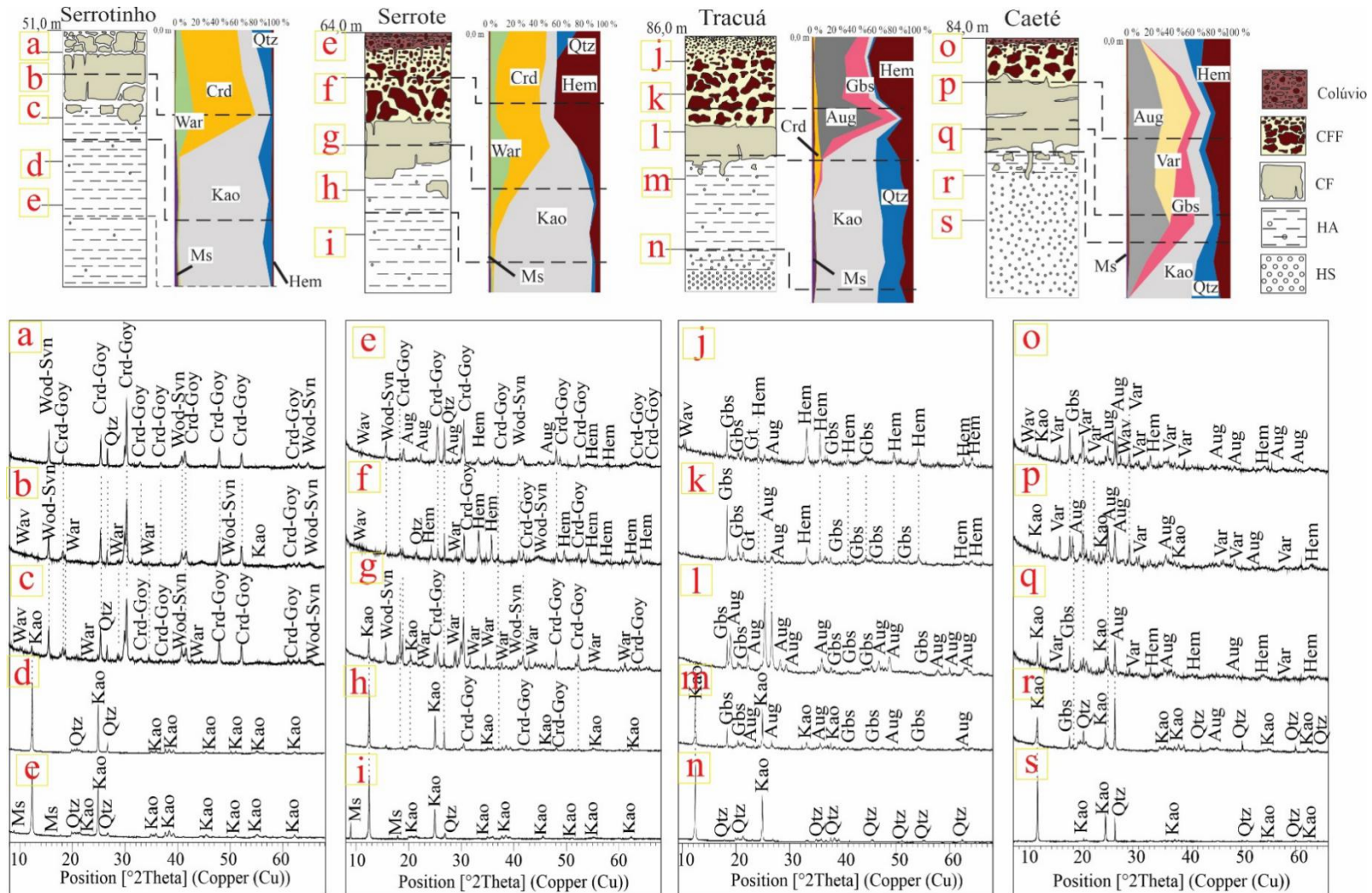


Figura 6 - Distribuição da mineralogia ao longo dos perfis relacionando os horizontes descritos com a mineralogia acusada pela difração e raio x. Legenda: Crd – série de solução sólida (s.s.s.) Crandallita-Goyazita (Crd-Goy) + Woodhouseíta-Svanbergita (Wod-Svn), War – Wardita, Aug- Augelita, Var – Variscita, Kao- Caulinita, Qtz – Quartzo, Hem – Hematita, Gt-Goethita, Gbs – Gibbsita, Ms - Muscovita.

Quando maciça, a gibbsita ocorre geralmente contornando alguns nódulos de augelita ou intercrescida com a augelita no cimento, indicando uma possível substituição deste último mineral (fig. 8). Na forma de agregados cristalinos, a gibbsita ocorre preenchendo pequenas cavidades distribuídas aleatoriamente pela crosta fosfática aluminosa.

Em todos os perfis são encontrados ainda cristais de wavellita preenchendo cavidades pela crosta fosfática e principalmente, quando presente, na crosta ferroaluminosa-fosfática. A wavellita nessas cavidades é incolor e se apresenta na forma de agregados cristalinos milimétricos a submilimétricos e de hábito drusiforme, bastante semelhante aos cristais identificados em Sapucaia por Costa *et al.* (2020).

Na crosta ferroaluminosa fosfática (Fig. 7 e 8), os fosfatos supracitados constituem o cimento que envolve nódulos e esferólitos de hematita, desenhando a típica textura tipo pele de onça dessa crosta nesses perfis. Os nódulos e esferólitos de hematita são vermelhos e opacos em lâmina delgada (Fig. 7 e 8). Internamente, eles são criptocristalinos, maciços a coloformes, localmente microcavernosos e exibem com frequência um córtex microbandado e coloforme de goethita marrom avermelhada a alaranjada. O cimento fosfático constitui-se dos mesmos minerais dos nódulos, da mesma forma da crosta fosfática subjacente em cada perfil.

Na crosta ferroaluminosa fosfática do perfil de Caeté e em parte na crosta fosfática, no entanto, além dos minerais descritos há uma extensiva ocorrência de variscita que mesoscopicamente se apresenta de forma maciça, envolvendo os nódulos de augelita e substituindo a augelita e a gibbsita em algumas porções do cimento, geralmente próximo a cavidades (Fig. 8). Em lâmina, este mineral ocorre como agregados criptocristalinos a microcristalinos, de coloração marrom amarelada, e intercrescidos com a augelita. Em algumas porções, chega a predominar em relação a augelita e gibbsita, deixando estes dois minerais com texturas reliquiares (Fig. 8).

4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

4.3.1 Distribuição dos Elementos Químicos Maiores e Menores nos Perfis Lateríticos

A composição química dos perfis investigados nos quatro depósitos está apresentada nas tabelas 2 e 3. Na tabela 3 estão as análises químicas multi-elementares, porém restritas apenas ao horizonte de fosfatos.

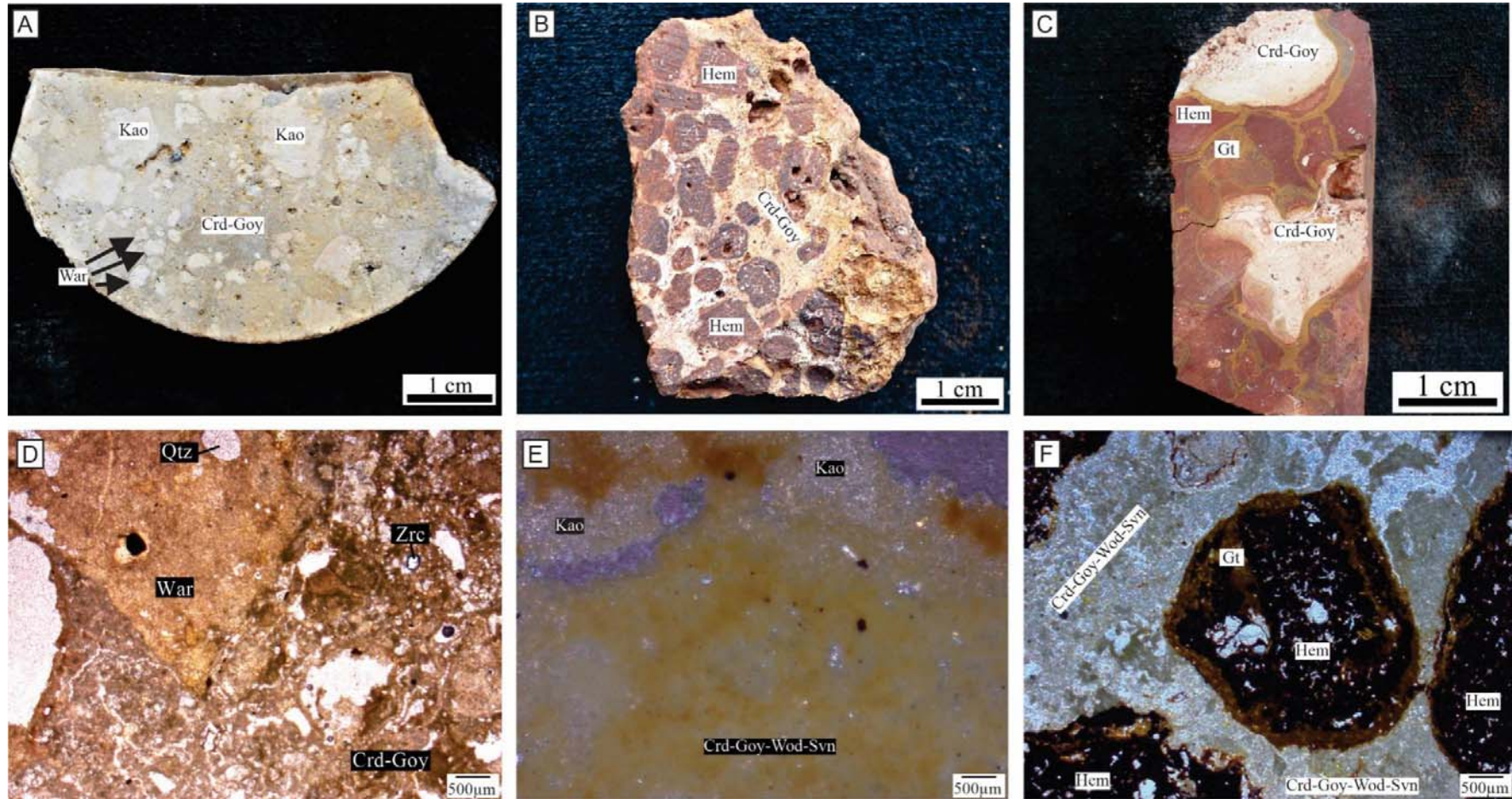


Figura 7 - Amostras representativas das crostas fosfática e ferrofosfática encontradas em Serrotinho e Serrote. A) Crosta fosfática com alguns nódulos de wardita (War) e caulinita (Kao) envolvidos por um cimento de crandallita-goyazita intercrescida com woodhouseíta-svanbergita (Crd-Goy). B) Crosta ferrofosfática com nódulos e esferólitos de hematita e goethita cimentados por Crandallita-Goyazita-Woodhouseíta-Svanbergita (Crd-Goy), definindo a textura do tipo pele de onça. C) Amostra da crosta ferrofosfática com nódulo Crandallita-Goyazita-Woodhouseíta-Svanbergita (Crd-Goy) cimentada por hematita e goethita. D) fotomicrografias da crosta fosfática, com destaque para o nódulo de wardita (War) em meio ao cimento crandallítico (Crd-Goy) e com , grãos reliquias de quartzo (Qtz) e zircão (Zrc). E) Fotomicrografia de detalhe dos nódulos de caulinita em meio ao cimento de crandallita-goyazita-woodhouseíta-svanbergita (Crd-Goy). F) Fotomicrografia de detalhe dos nódulos e esferólitos de hematita cimentados por crandallita-goyazita e woodhouseíta-svanbergita, intercrescidos.

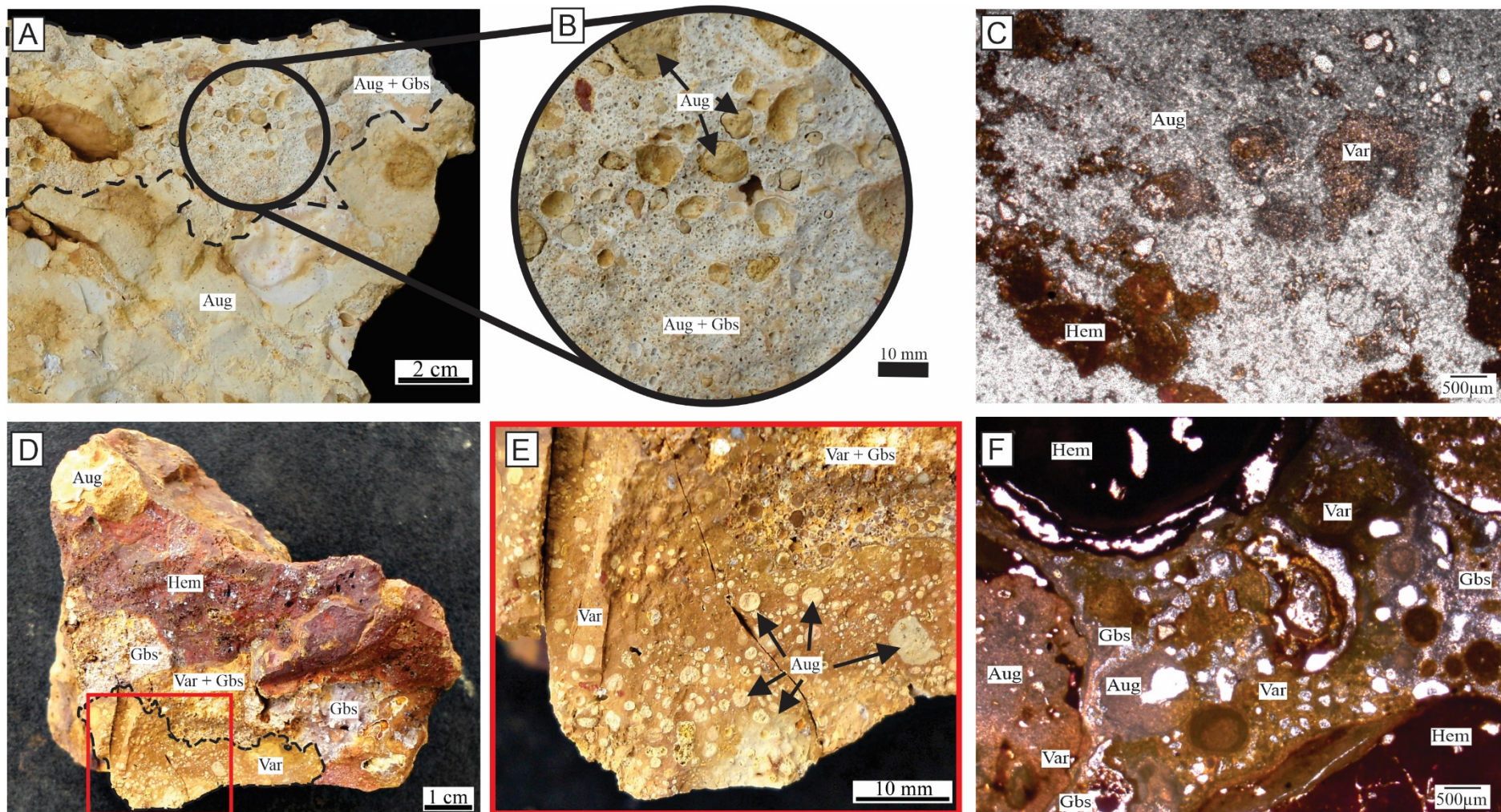


Figura 8 - Amostras representativas das crostas fosfáticas e ferrofosfáticas de Tracua e Caeté. A) Crosta fosfática de Tracua, exibindo o cimento maciço de augelita (porção basal) alterando para um cimento de augelita (Aug) + gibbsita (Gbs). B) Detalhe da mesma amostra, exibindo os nódulos de augelita envoltos pela matriz de augelita + gibbsita. C) Amostra da crosta ferrofosfática de Caeté ressaltando a relação de contato entre variscita (Var), augelita (Aug) e gibbsita (Gbs) próximo ao nódulo de hematita (Hem). D) detalhe da amostra anterior, mostrando os nódulos de augelita em meio ao cimento de variscita e em contato com o cimento de variscita+gibbsita. E) Fotomicrografia da crosta fosfática de Caeté exibindo o cimento de augelita (Aug) intercrescido com gibbsita (Gbs) e localmente com a variscita (Var). F) Fotomicrografia da crosta ferroaluminosa fosfática de Caeté, com destaque para as relações de substituição da augelita (Aug) e gibbsita (Gbs) em variscita e em meio aos nódulos de hematita.

As concentrações dos elementos químicos em geral mostram que cada horizonte de cada perfil exibe composição química similar e isto é ainda mais bem observado nos perfis de distribuição dessas concentrações ao longo dos perfis (Fig. 9). Como é típico, na porção inferior dos perfis, nos horizontes saprolítico e argiloso, predominam elevados teores de SiO_2 , Al_2O_3 e perda ao fogo (P.F.) que decrescem em direção às crostas, enquanto neste sentido os de P_2O_5 e Fe_2O_3 aumentam, sendo que o primeiro na crosta fosfática aluminosa e os de Fe_2O_3 na crosta ferroaluminosa fosfática, quando pode alcançar até a 42%.

Os teores de CaO e Na_2O nos perfis de Serrote e Serrotinho, concentram-se fortemente nas crostas (Fig. 9), com até a 6,8% e 1,5%, respectivamente, ricos em fosfatos tipo crandallita-goyazita e wardita, porém em Caeté e Tracuá os teores não ultrapassam 0,6%, onde os fosfatos de alumínio são predominantemente augelita e variscita. Nos 4 perfis os valores de TiO_2 variam de 0,4% e 1,9%, na faixa comum da maioria dos perfis lateríticos (Costa *et al.* 2016), e os de K_2O , MgO e MnO são relativamente baixos, raramente alcançam valores acima de 0,5%, também compatíveis com a composição da porção superior dos perfis lateríticos (Schellmann 1980, Costa *et al.* 2016). Suas concentrações decrescem da base para o topo dos perfis, em conformidade com os perfis lateríticos em geral. Da mesma forma que a mineralogia distingue os depósitos de Serrotinho e Serrote (com fosfatos de cálcio/estrôncio e sódio) de Tracuá e Caeté (com fosfatos apenas de alumínio, além de gibbsita), a composição química representada por Al_2O_3 e P_2O_5 , e claro CaO e SrO , também demonstram essa diferença. A presença de Al_2O_3 é relativamente maior nos dois últimos, relativo aos teores de P_2O_5 , que tendem a ser menores, devido a presença da gibbsita junto da augelita em Tracuá e junto da augelita e variscita em Caeté. Porém a distinção química mais marcante entre os dois grupos de depósitos é dada pelas concentrações contrastantes de CaO e Na_2O (Fig. 9), que representam os contrastes mineralógicos.

4.3.2 Elementos Traço

As concentrações dos elementos traços foram obtidas apenas para as amostras das crostas, conforme a tabela 3, e desta forma não é possível a avaliação da distribuição desses elementos ao longo do perfil. Suas concentrações são variáveis, porém nota-se que a concentração dos elementos Sr, Cr, Ga, Hf, Hg, Nb, Se, Sn, Ta, Th, U, W, Y, Zr e ETR encontram-se acima da UCC, contrastando com os demais, abaixo da UCC (Fig. 9). Dos elementos com valores acima da UCC, o Sr está retrata a série mineral crandallita-goyazita, enquanto os demais são típicos de minerais resistatos como zircão, turmalina, rutilo e nos óxidos-hidróxidos de Fe e Al, com exceção do Cr, Ga e Ge.

Tabela 2 - Composição química de amostras dos perfis lateríticos fosfáticos ao longo dos furos de sondagem em comparação com a média da crosta continental superior (Upper Continental Crust/UCC1). *Soma dos teores de SrO e SO₃ inferidos pela diferença do valor total calculado em 100%, cuja presença foi constatada pelas análises da ALS contidas na tabela 3). (-) Elementos não determinados

Horizontes	Profundidade	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	P.F.	Outros*
SRO-HF	1.00 m	23.7	26.8	2.22	5.16	0.12	0.38	0.06	0.63	<0.01	19.77	14.98	6.18
	2.00 m	16.4	31.3	2.08	5.96	<0.10	0.89	0.05	0.75	<0.01	21.77	17.25	3.55
	3.30 m	7.47	34	1.3	6.81	<0.10	1.4	0.05	0.5	<0.01	26.39	18.91	3.17
SRO-HA	4.50 m	52.1	32.5	2.28	0.09	<0.10	<0.10	0.27	0.76	<0.01	0.42	12.49	-
	6.50 m	46.5	36.7	2.31	0.05	<0.10	<0.10	0.42	0.8	<0.01	0.24	13.4	-
	8.50 m	50.6	34.5	1.59	0.01	<0.10	<0.10	0.25	0.49	<0.01	0.06	12.28	0.22
SRO-HS	11.00 m	46.1	37.2	1.79	0.04	0.13	<0.10	0.38	0.92	<0.01	0.13	13.14	0.17
SRT-HFF (Solo)	0.6 m	20.9	21.4	20.2	3.66	<0.10	1.27	0.03	1.4	0.02	16.59	13.98	0.55
SRT-HFF	1.5 m	0.98	22	38	5.51	<0.10	0.51	0.05	1.4	0.01	16.72	13.76	1.06
	2.5 m	1.35	22.1	40.7	5.11	<0.10	0.37	0.03	1.39	0.01	15.24	14.11	-
	3.5 m	1.32	21.4	41.9	4.91	<0.10	0.42	0.03	1.36	0.01	15.3	13.4	-
SRT-HF	4.5 m	2.6	30.7	21.8	4.72	<0.10	1.55	0.04	1.55	0.01	19.41	17.73	-
	5.75 m	27.7	30.8	6.87	1.86	<0.10	1.11	0.07	1.58	0.01	11.11	15.72	3.17
SRT-HA	7.00 m	36.6	34.6	3.73	1.03	<0.10	0.25	0.14	1.04	<0.01	5.37	14.5	2.74
	8.00 m	38.7	34.1	9.73	0.39	<0.10	<0.10	0.1	0.87	<0.01	1.91	14.05	0.15
SRT-HS	9.00 m	43.3	34.9	4.63	0.26	<0.10	<0.10	0.13	0.76	<0.01	1.02	13.46	1.54
	10.00 m	45.5	35.6	5.28	0.15	<0.10	<0.10	0.21	0.74	0.01	0.67	13.14	-
TRD-HFF	0.90 m	3.97	31.9	33.38	0.16	0.05	0.01	0.01	1.26	0.01	13.8	15.02	0.43
	1.80 m	2.16	31.7	38.59	0.06	0.03	0.01	<0.01	1.25	0.01	9.42	15.38	1.39
	2.70 m	2.09	34.3	34.81	0.15	0.12	0.01	<0.01	1.37	0.01	10	16.29	0.85
	3.50 m	5.84	36.8	28.36	0.39	0.25	0.01	0.01	1.39	0.01	8.32	17.99	0.63
TRD-HF	4.25 m	2.9	44.3	9.66	0.36	0.24	0.02	0.02	1.86	0.02	21.6	18.46	0.56
	5.00 m	19.65	33.8	23.24	0.48	0.32	0.03	0.12	1.52	0.03	5.64	15.72	-
TRD-HA	5.60 m	47.8	24.6	13.15	0.81	0.5	0.02	0.18	0.87	0.03	0.93	10.77	0.34
	6.20 m	49.3	26.5	12.26	0.51	0.34	0.03	0.29	0.71	0.03	0.28	10.4	-
	7.80 m	46.1	30.4	10.29	0.03	0.07	0.03	0.24	1.18	0.06	0.24	11.43	-
	8.80 m	45.4	31.6	8.54	<0.01	0.07	0.04	0.4	1.14	0.05	0.13	11.72	-
	9.80 m	44.4	28.1	14.84	0.01	0.08	0.04	0.33	1.04	0.07	0.21	11.37	-
TRD-HS	10.70 m	67.5	17.7	8.1	0.01	0.06	0.02	0.17	0.47	0.04	0.12	6.89	-
CTD-HFF	0.35 m	32.4	15	21.64	0.18	0.13	0.01	0.03	1.05	0.02	3.48	25.47	0.59
	1.35 m	11.5	28.3	27.85	0.09	0.08	0.02	0.02	1.45	0.02	17	14.26	-
CTD-HF	2.35 m	8.86	37	13.9	0.13	0.09	0.03	0.04	1.7	0.02	22.8	15.26	0.17
	3.55 m	10.5	32	23.34	0.12	0.05	0.02	0.03	1.37	0.02	17.55	14.64	0.36
	4.35 m	12.85	40.9	11.33	0.12	0.06	0.03	0.05	1.62	0.02	16.1	17.01	-
	5.15 m	14.4	44	8.36	0.07	0.07	0.03	0.08	1.52	0.02	12.15	18.88	0.42
CTD-HA	5.90 m	29.9	33.6	15.34	0.06	0.09	0.03	0.13	1.63	0.03	5.39	14.02	-
CTD-HS	7.00 m	64.6	16.2	11.15	0.01	0.05	0.01	0.08	0.51	0.03	0.5	6.85	0.01
UCC ¹		66.6	15.4	5.6	3.6	2.48	3.3	2.8	0.6	0.1	0.15	-	-

Fonte: ¹Rudnick & Gao (2014).

A semelhança mineralógica entre Serrotinho e Serrote, dominados por crandallita-goyazita e woodhouseita-svanbergita, em contraste com Tracuá e Caeté em que prevalecem augelita/variscita, ou seja, os primeiros como ricos em Ca, Sr e Na e os segundos desprovidos destes, não apresentam divergências marcantes nas concentrações dos elementos traços. Certamente porque os valores das concentrações de grande parte deles, já se encontram ao nível ou abaixo da média da UCC (Ag, Bi, Cd, Co, Cs, Cu, Ge, In, Li, Mo, Ni, Rb, Sb, Sc, Tl e Zn). Entre os dois grupos de depósitos em termos de elementos traços a distinção entre eles é mais bem demonstrada pelas concentrações de As, Bi, Hg, Se e V, que provavelmente estão refletindo os óxidos-hidróxidos de Fe, e neste as crostas ferroaluminosas fosfáticas, mascarando assim a divisão em dois grupos.

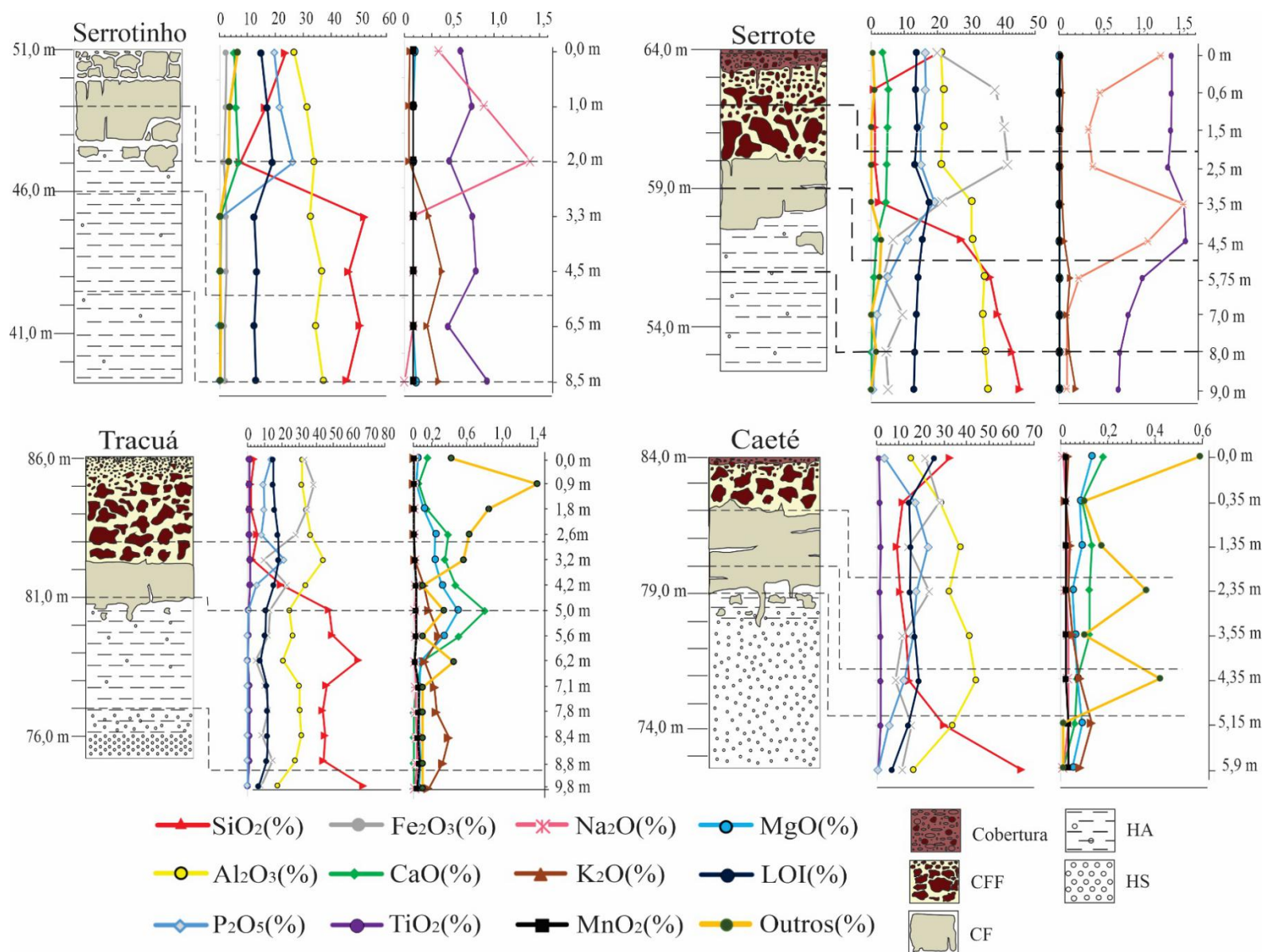


Figura 9 - Distribuição das concentrações dos elementos químicos mais abundantes (maiores e menores) ao longo dos perfis lateríticos de Serrotinho, Serrote, Tracua e Caeté. *Outros: soma dos valores de sulfato (SO_3) e de estrôncio (SrO) obtidos pela diferença do valor total e calculados para 100%.

Tabela 3 - Concentração dos elementos maiores, menores e traços das crostas fosfáticas e ferrofosfáticas de Serrotonho (SRO), Serrote (SRT), Tracua (TRD) e Caeté (CTD) obtidas pela ALS em comparação com a média da Crosta Continental Superior (Upper Continental Crust/UCC)¹.

(continua)

	SRO-HF	SRT-HFF	SRT-HF	TRD-HFF	TRD-HF	CTD-HFF	CTD-HF	UCC ¹
SiO ₂	4,8	2,2	5,2	3,1	2,0	5,7	8,7	66,6
Al ₂ O ₃	33,1	27,4	36,5	34,2	49,2	29,4	41,3	15,4
Fe ₂ O ₃	1,3	27,0	2,3	24,1	5,0	18,4	11,8	5,6
CaO	6,1	4,4	3,0	0,1	0,0	0,1	0,2	3,6
MgO	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
Na ₂ O	1,8	0,9	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3
K ₂ O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,8
TiO ₂	0,4	1,2	1,5	1,2	2,1	1,4	1,7	0,6
MnO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
P ₂ O ₅	26,9	15,5	23,2	21,0	19,8	24,8	19,4	0,2
SrO	3,7	1,3	1,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0
SO ₃	3,0	3,1	3,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
P.F.	20,9	18,2	22,1	16,6	22,2	19,7	18,2	-
Total	102,0	101,2	101,0	100,6	100,5	99,6	101,6	100,8
Ag	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,1
As	1,2	8,6	3,4	13,0	19,1	19,2	24,5	4,8
Ba	601,0	153,5	167,5	267,0	295,0	275,0	468,0	628,0
Bi	0,1	0,4	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2
Cd	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,1
Co	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	17,3
Cr	60,0	160,0	120,0	130,0	180,0	170,0	140,0	92,0
Cs	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	4,9
Cu	<1	4,0	11,0	29,0	6,0	25,0	15,0	28,0
Ga	30,4	55,9	49,4	50,0	65,4	80,4	74,8	17,5
Ge	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	1,4
Hf	7,8	15,5	19,9	19,4	27,5	28,6	23,9	5,3
Hg	0,0	0,1	0,1	0,3	0,0	1,1	1,0	0,1
In	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	2,1
Li	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	24,0
Mo	<1	<1	<1	1,0	2,0	<1	<1	1,1
Nb	7,0	28,8	34,2	23,4	39,8	27,6	31,7	12,0
Ni	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	47,0
Pb	13,0	33,0	32,0	38,0	55,0	41,0	61,0	17,0
Rb	0,7	0,5	0,6	0,6	0,6	1,2	2,1	84,0
Sb	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,4
Sc	48,0	8,0	5,0	10,0	7,0	13,0	7,0	14,0
Se	<0,2	0,7	0,3	0,4	1,8	0,9	2,0	0,1
Sn	1,0	4,0	4,0	4,0	6,0	7,0	5,0	2,1
Sr	>10000	>10000	9830,0	922,0	440,0	604,0	1295,0	320,0
Ta	0,7	2,2	2,6	2,0	3,1	2,4	2,6	1,1

(conclusão)

	SRO-HF	SRT-HFF	SRT-HF	TRD-HFF	TRD-HF	CTD-HFF	CTD-HF	UCC ¹
Te	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	-
Th	8,0	22,0	23,8	19,4	29,0	19,1	23,8	11,0
Tl	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,9
U	9,1	1,9	3,0	3,0	4,6	3,9	3,9	2,7
V	42,0	415,0	83,0	284,0	191,0	348,0	299,0	97,0
W	1,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	1,9
Y	196,5	16,2	21,3	19,0	28,3	23,8	24,8	21,0
Zn	28,0	29,0	78,0	13,0	15,0	59,0	14,0	67,0
Zr	278,0	570,0	746,0	738,0	1070,0	1020,0	901,0	193,0
La	22,9	80,1	67,6	52,1	71,8	53,2	84,9	31,0
Ce	56,5	137,0	108,5	97,4	140,5	102,5	159,0	63,0
Pr	7,3	14,6	12,0	10,9	15,3	12,0	18,3	7,1
Nd	28,3	47,3	38,0	38,5	54,9	43,5	68,2	27,0
Sm	4,0	8,0	6,2	6,7	9,6	7,9	12,1	4,7
Eu	0,9	1,9	1,5	1,5	2,4	1,8	2,7	1,0
Gd	6,8	5,0	4,3	4,5	7,6	4,8	7,8	4,0
Tb	1,6	0,8	0,7	0,7	1,1	0,8	0,9	0,7
Dy	17,3	4,1	4,0	3,7	6,1	4,6	5,0	3,9
Ho	5,7	0,7	0,8	0,8	1,2	0,9	0,9	0,8
Er	19,5	1,9	2,6	2,4	3,5	2,9	2,9	2,3
Tm	2,9	0,3	0,4	0,4	0,6	0,5	0,5	0,3
Yb	16,8	2,0	2,8	2,5	3,8	3,3	3,3	2,0
Lu	2,0	0,3	0,5	0,4	0,7	0,5	0,5	0,3
ETRL	120,0	288,8	233,7	207,0	294,4	220,8	345,1	133,8
ETRP	72,4	15,2	16,1	15,2	24,3	18,3	21,8	14,3
ΣETR	192,3	304,0	249,8	222,2	318,8	239,1	366,9	148,1
TOT/C	0,5	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	-
TOT/S	1,2	1,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-

Fonte: ¹Rudnick & Gao (2014).

5 DISCUSSÕES

A partir dos diagramas ternários (Fig. 10) é possível constatar que os depósitos de Serrotonho, Serrote, Tracuá e Caeté apresentam a assinatura química semelhante ao da região do Gurupi (Fig. 10A), e que inclui o depósito de Bonito (Sapucaia e Boa Vista) e as ocorrências de Jandiá, Pirocaua, Cansa Perna, dentre outros (Costa 1980, Costa M. & Costa W. 1987, Costa *et al.* 2016).

É observado também, no diagrama no diagrama CaO-SO₃-SrO (Fig. 10B), que a assinatura dos fosfatos APS presentes nas crostas exibem uma composição intermediária entre as séries de solução sólida (s.s.s) crandallita-goyazita e woodhouseita-svanbergita, realçando o intercrescimento de difícil individualização observado na petrografia.

No diagrama SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ (Fig. 10C), nota-se ainda a diferenciação química presente nos horizontes o longo dos perfis. Como já mencionado, em todos os perfis, observa-se uma tendência do SiO₂ à lixiviação, onde seus teores diminuem do horizonte saprolítico em direção a crosta ferrofossfática e, concomitantemente, há o enriquecimento relativo e absoluto de Al₂O₃ e Fe₂O₃ neste mesmo sentido.

No diagrama P₂O₅-Fe₂O₃-Al₂O₃ (Fig. 10D) torna-se mais a individualização das crostas fosfáticas e ferrofossfáticas, onde o enriquecimento em Fe₂O₃ é acompanhado pelo empobrecimento relativo de P₂O₅ e Al₂O₃ no topo dos perfis.

5.1 ASSOCIAÇÕES GEOQUÍMICAS

As análises de agrupamento (Fig. 11) permitiram identificar 3 grupos de elementos químicos, enquadrados como associações geoquímicas. A primeira é representada pela associação SiO₂-K₂O-Rb, a segunda por CaO-SrO-SO₃-P₂O₅-Na₂O-MnO-P.F.-Zn-U-Ba-ETRP-Y-Sc e a terceira por Fe₂O₃-TiO₂-V-Sb-In-Ta-Nb-Th-Cr-Sn-W-Zr-Hf-Ga-As-ETRL-Pb.

A primeira associação reflete diretamente a presença de muscovita nos perfis e é observada com frequência em perfis lateríticos descritos em várias regiões do mundo (Schellmann 1980, 1994, Freyssinet *et al.* 2005, Costa 1997, Costa *et al.* 2014 e Costa *et al.* 2016). A segunda reflete os fosfatos, principalmente crandallita-goyazita, woodhouseita-svanbergita e wardita. Nesta associação, nota-se ainda uma afinidade maior entre SrO e SO₃ com CaO, representada pela correlação positiva presente nos diagramas de dispersão da figura 12.

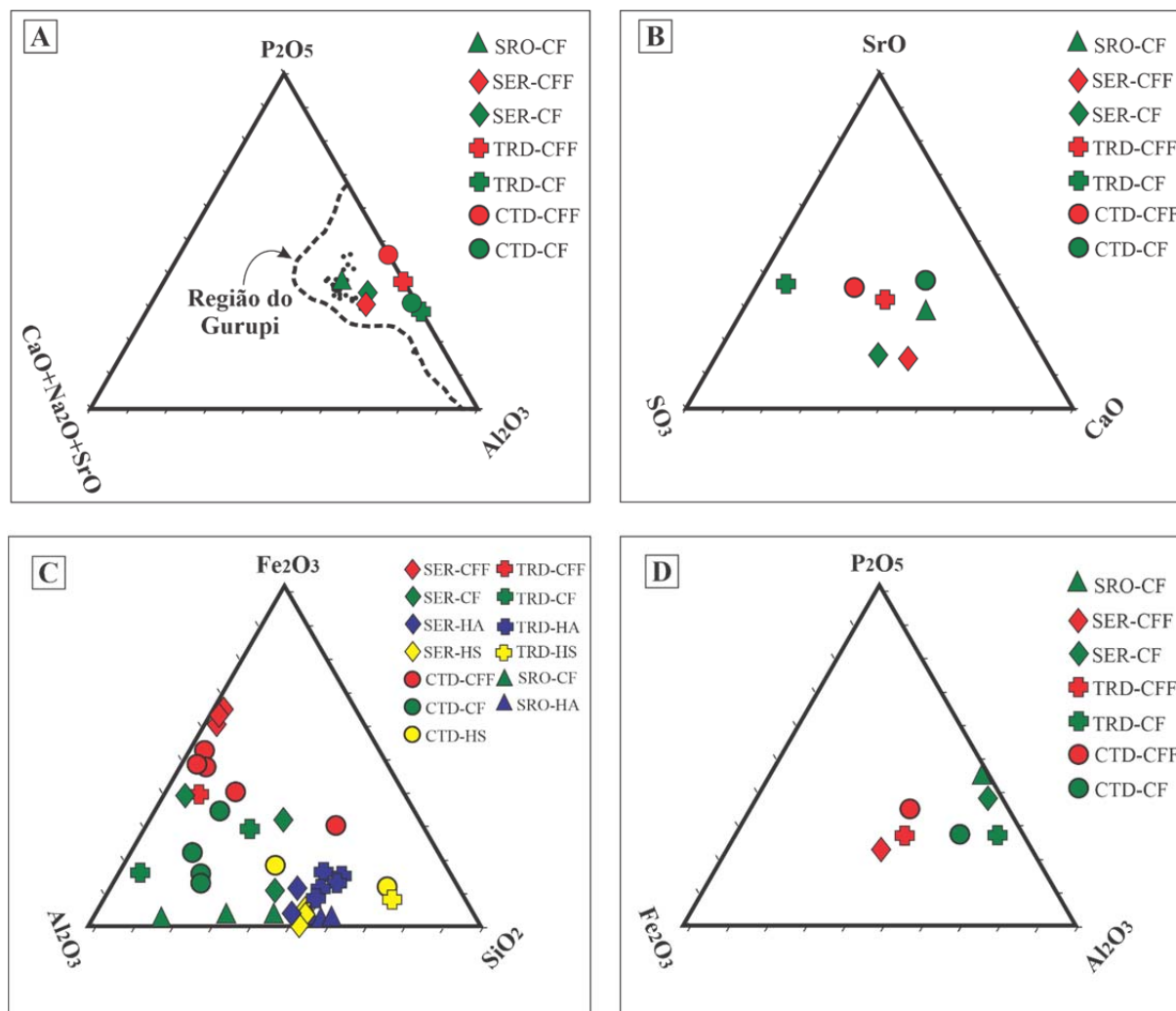


Figura 10 - Diagramas ternários com as composições de P_2O_5 - Al_2O_3 -($CaO + Na_2O + SrO$), CaO - SrO - SO_3 , SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 e P_2O_5 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 , ressaltando a assinatura química e associações geoquímicas entre os perfis e entre as crostas fosfáticas (verde) e ferroaluminosa fosfática (vermelhas) desse estudo. A) Amostras de Serrotonho (triângulo), Serrote (losango), Tracua (cruz) e Caeté (círculo) plotadas no diagrama ternário P_2O_5 - Al_2O_3 -($CaO + Na_2O + SrO$) exibindo a similaridade na assinatura química com a da região do Gurupi e em comparação com as amostras de Sapucaia e Jandiá (pontos pretos). B) Diagrama ternário CaO - SrO - SO_3 , exibindo uma composição intermediária dentro da série crandallita-goyazita-woodhouseíta-svanbergita para os alvos Serrotonho (triângulo) Serrote (losango), Tracua (cruz) e Caeté (círculo). C) Diagrama ternário SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 , mostrando as diferenças químicas entre o perfil e acusando a evolução supergênica dos perfis, com tendência de diminuição do Si e aumento do Fe e Al. D) Diagrama ternário P_2O_5 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 acusando a diferença nos teores desses três elementos entre as crostas fosfáticas e ferrofosfáticas.

Essa afinidade ocorre devido à grande semelhança entre as estruturas cristalinas das duas séries crandallita-goyazita e woodhouseíta-svanbergita, onde esses minerais podem se substituir mutuamente e, como já foi mencionado, estão presentes como uma solução sólida de crandallita-goyazita-woodhouseíta-svanbergita. A wardita, entretanto, não compartilha essas semelhanças e forma uma fase isolada (Schwab *et al.* 2004), tal como foi observado em lâmina.

O mesmo ocorre com a associação Ba-U-Y-Sc-HREE em que provavelmente está relacionada a fase gorceixita-florencita, não indicada, mas possivelmente presente como fase

acessória a traço. A presença de gorceixita-florencita em perfis lateríticos não é incomum e tem sido comumente estimada em perfis (bauxíticos e fosfáticos) na região amazônica (Costa *et al.* 2014, 2016).

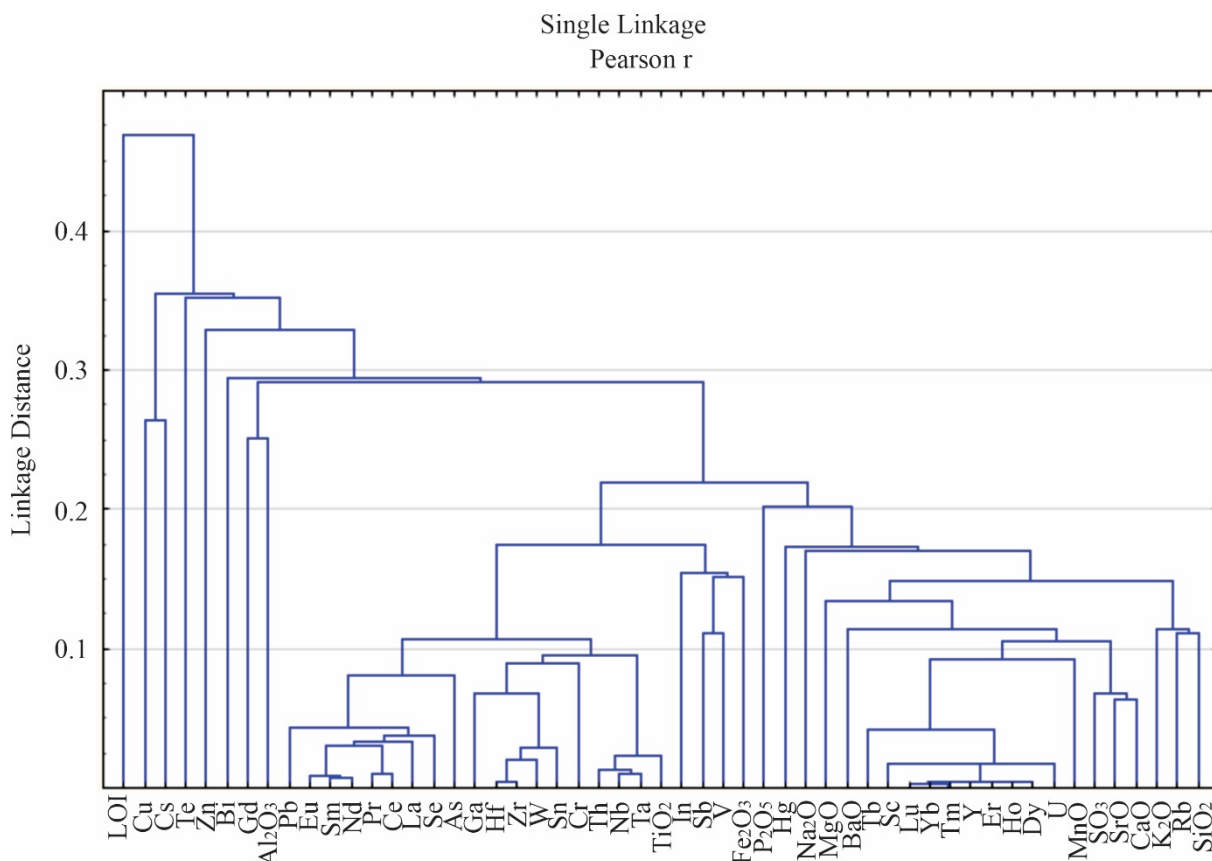


Figura 11 - Análise de agrupamento dos elementos químicos mostrando as relações entre as crostas fosfáticas e ferrofosfáticas analisadas.

A terceira associação está ligada aos óxidos de ferro, anatásio e zircão. O Fe_2O_3 está diretamente ligado a concentração de hematita e goethita ao longo dos perfis, enriquecendo-se em direção às crostas ferrofosfáticas. Sua associação com o V, indicada pela correlação positiva, é comum em ambientes lateríticos e está relacionada a própria estrutura dos óxidos-hidróxidos de ferro, onde o V pode ocorrer adsorvido na superfície dos óxidos-hidróxidos e/ou substituindo parcialmente o Fe^{+3} por V^{+3} nesses minerais (Schwertmann & Pfab 1994).

O TiO_2 está presente principalmente na forma de anatásio e, mais raramente, de rutilo na assembleia de minerais pesados identificados em lâmina delgada. A associação do TiO_2 com o Ta, Th e Nb pode ser explicada pela capacidade destes minerais em substituir o Ti na estrutura dos minerais supracitados. A forte correlação entre TiO_2 e o Zr, indicado na figura 13, acusa o caráter residual dominante desses elementos, relacionados as fases rutilo, ilmenita, anatásio e zircão, cuja presença é muito comum em perfis lateríticos e bauxíticos da região Amazônica (Costa 1991, 1997, Costa *et al.* 2014, 2016).

Na terceira associação, os elementos Zr-Hf-Ga-Sn-Se-As-Pb-LREE mostram FORTE afinidade entre si e provavelmente estão relacionados ao zircão, presente, como mostram as análises microscópicas em lâminas delgadas. Esta associação ocorre devido a capacidade desses elementos em substituir parcialmente o zircônio na estrutura cristalina do zircão (Finch & Hanchar 2003).

Essas associações também são evidentes nas curvas normalizados dos elementos em relação à UCC (Fig. 14). Nota-se inicialmente que os elementos apresentam comportamento similar em quase todos os perfis, com exceção de Serrotinho. Os elementos que variam da tendência geral, CaO, Na₂O, Fe₂O₃, As, Ba, Bi, Hg, Mo, Nb, Sc, V, W, Y e Zn, estão relacionados à divergência das espécies minerais em fosfatos de alumínio entre os quatro perfis e ao longo do perfil de cada um. Para CaO, Na₂O, Ba e Y, as principais discrepâncias estão relacionadas a mineralogia fosfática do tipo APS (crandallita-goyazita e woodhouseíta-svanbergita) em Serrotinho e Serrote e simples (augelita e variscita) em Tracuí e Caeté, enquanto os elementos Fe₂O₃, As, Ba, Bi, Hg, Mo, Nb, Sc, V, W, Y e Zn estão intimamente relacionadas as variações no óxidos-hidróxidos de ferro nas crostas fosfáticas e ferrofosfáticas.

5.2 ELEMENTOS TERRAS RARAS NORMALIZADOS (ETR_N)

Os valores normalizados dos elementos terras raras em relação a Crosta Continental Superior/UCC (Rudnick & Gao 2014), mostram tendência geral de enriquecimento de elementos terras raras leves (ETRL) nas crostas fosfáticas em relação a crostas ferrofosfática (Fig. 15A). A única exceção ocorre na crosta fosfática de Serrotinho, onde também é observada anomalia negativa no Eu, mas exibe um relativo enriquecimento de elementos terras raras pesados (ETRP) em relação aos elementos terras raras leves (ETRL).

Da mesma forma, a normalização em relação aos condritos (Evensen *et al.* 1978) mostram um enriquecimento do ETRL em relação aos ETRP, assim como uma suave anomalia negativa em Eu. (Fig. 15B). Serrotinho apresenta uma concentração anômala de ETRP em detrimento aos ETRL (Fig. 15A). Quando comparado com os valores de Sapucaia normalizados em relação aos condritos (fig. 15C), Costa *et al.* (2016), observa-se que todos os alvos apresentam um padrão muito semelhante aos encontrados em Sapucaia (Fig. 15D). Em relação aos elementos terras raras, nota-se um enriquecimento dos elementos terras raras leves em relação aos pesados. Quando comparado com a região do Gurupi, esse padrão é igualmente encontrado no depósito de Bonito, os quais incluem Sapucaia e Boa Vista (Costa *et al.* 2016) e na ocorrência de Jandiá (Costa 1990).

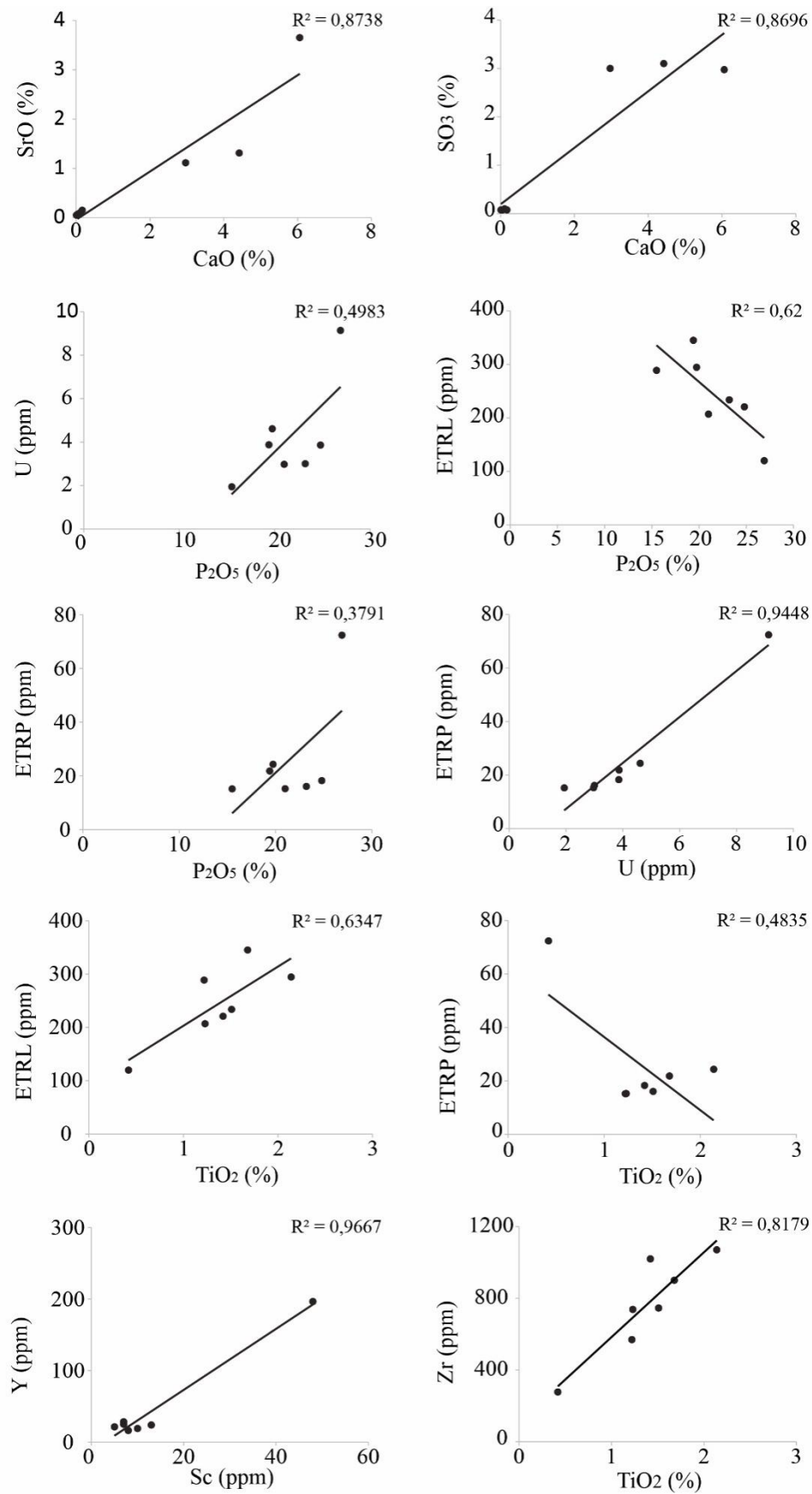


Figura 12 - Diagramas de dispersão com as principais afinidades geoquímicas observadas a partir das correlações positivas e negativas entre os elementos analisados.

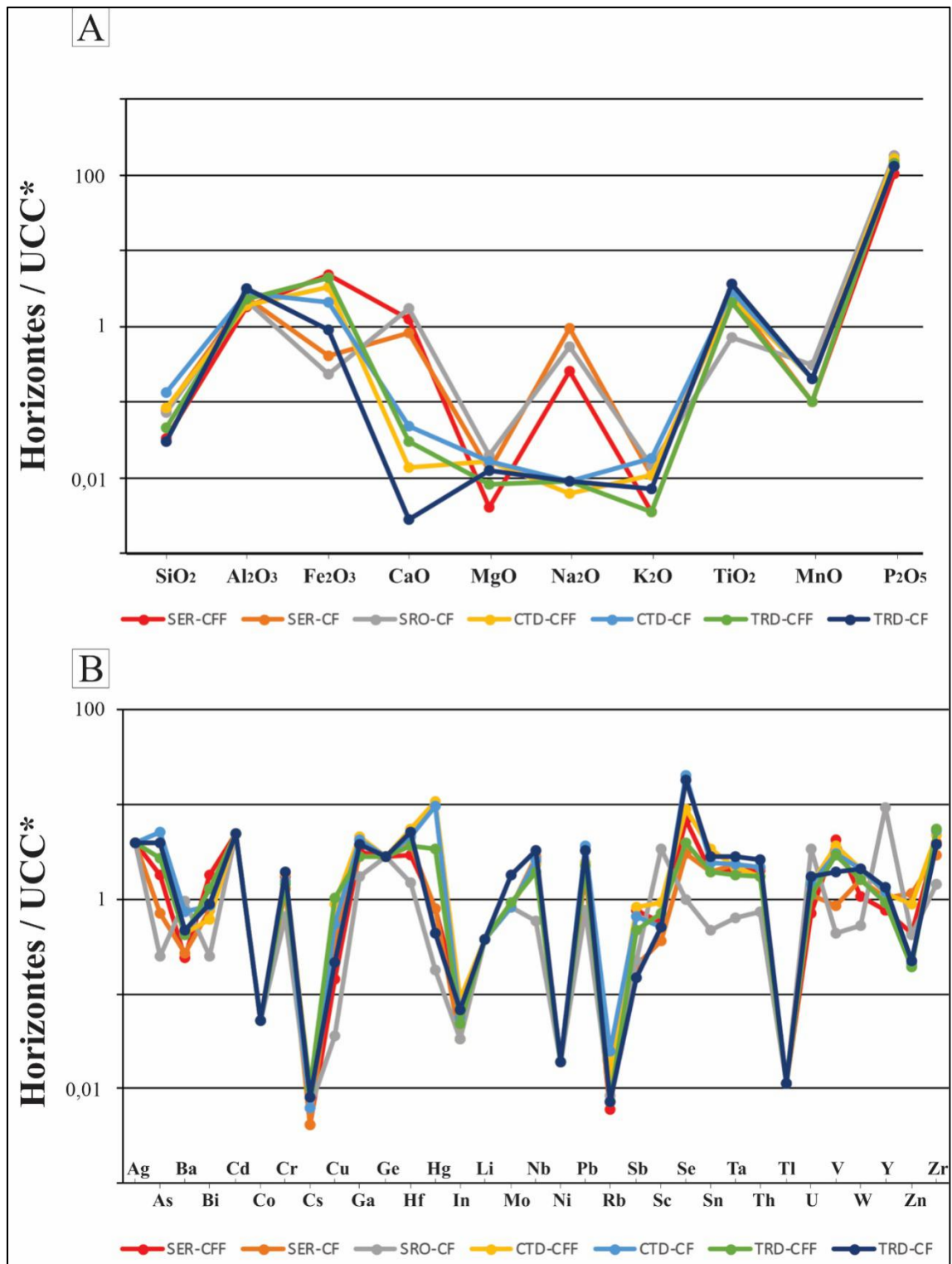


Figura 13 - Padrão de distribuição dos elementos maiores (A) e menores (B) normalizados em relação a Crosta Continental Superior (Upper Continental Crust). *Valores obtidos a partir de Rudnick & Gao (2014).

Além disso, esse padrão é característico em depósitos de fosfato enriquecidos em minerais APS, como os minerais da série da crandallita, e os exemplos mais representativos estão em Araxá, Catalão, Maicuru e Serra da Capivara (Costa *et al.* 2016, Lagler *et al.* 2016). Nota-se também que Serrotonho é o único que apresenta um padrão diferente, com ETRP

enriquecido em relação aos ETRL. Esta situação pode ser atribuída a vários fatores, no entanto, faz-se necessário a aquisição de mais dados químicos a fim de ratificar ou retificar esse padrão.

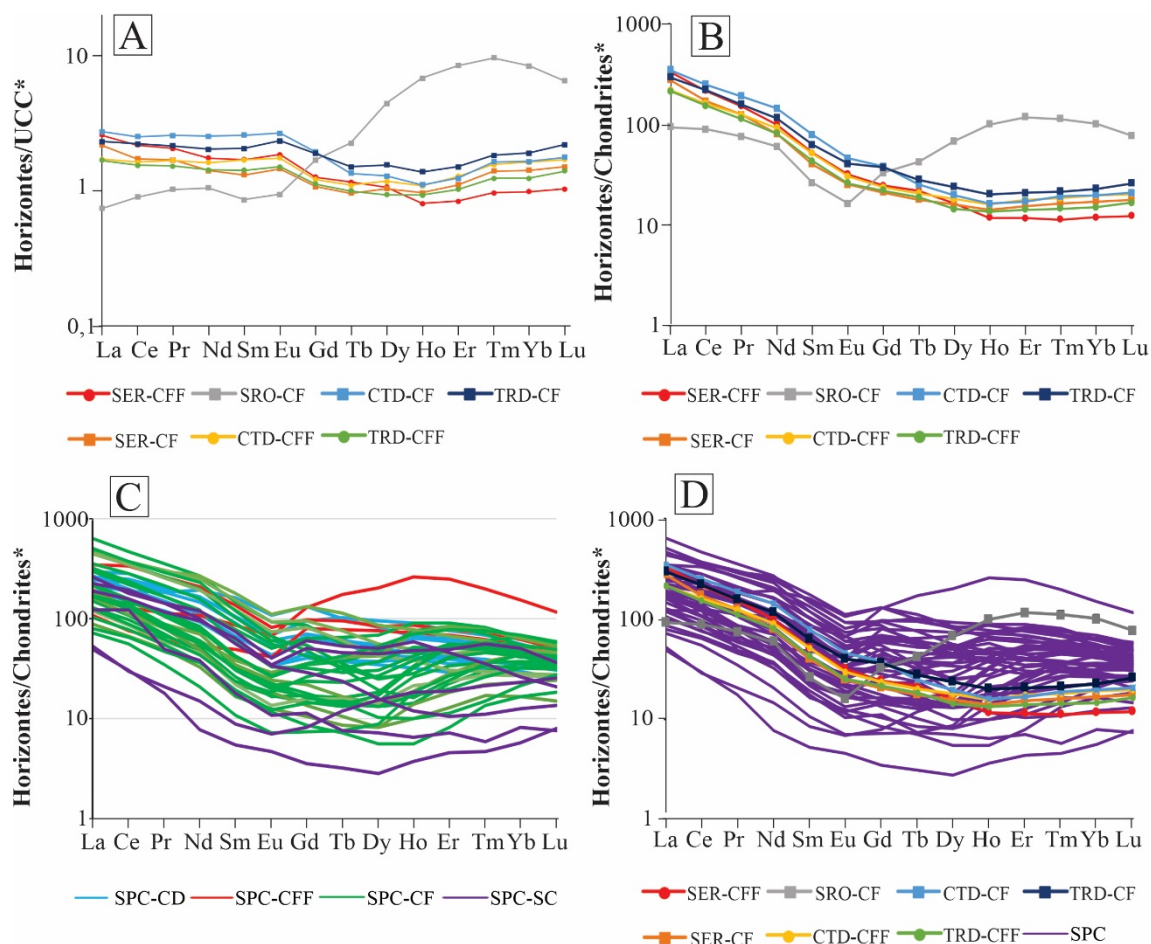


Figura 14 - Normalização dos elementos terras raras (ETR) dos horizontes em relação (A) aos valores da Crosta Continental Superior/UCC de Rudnick & Gao (2014); e B) em relação aos valores de Condritos (Chondrites) de Evensen *et al.* (1978); C) normalização dos horizontes de Sapucaia em relação aos condritos (Leite 2014); D) Comparação entre os horizontes de Sapucaia (roxo) com os horizontes desse estudo. Legenda: SC – Horizonte saprolítico, CF – Crosta fosfática, CFF – Crosta ferrofosfática, CD – Crosta desmantelada, SRO – Serrotilho, SER – Serrote, CTD – Caeté, TRD – Tracua, SPC – Sapucaia.

5.3 PRINCIPAIS CORRELAÇÕES E A ORIGEM DO FÓSFORO

Os depósitos de Serrotilho, Serrote, Tracua e Caeté guardam muitas semelhanças entre si e com os depósitos e ocorrências de fosfatos lateríticos da região do Gurupi, no nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão. De modo geral, os 4 alvos constituem morros isolados esculpidos nas formações lateríticas maduras completos a parcialmente truncados. Apresentam-se igualmente estruturados nos horizontes característicos e estão mineralizados em fosfatos de alumínio, os mesmos encontrados nos demais depósitos da região mencionada: saprolito, horizonte argiloso, crosta de fosfatos de alumínio e crosta ferroaluminosa fosfática

no topo, localmente, dismantelada e parcialmente obliterada por solos e sedimentos mais recentes. O saprólito e horizonte argiloso apresentam assinaturas texturais e estruturais (granulometria areia média a fina e silte; lentes e camadas alternadas com esses materiais; acamamento) e ainda mineralógicas (grãos de quartzo e palhetas de muscovita em matriz de caulinita) sugestivas de que derivaram de rochas sedimentares aluminossilicatadas, sendo correlacionáveis com os depósitos de Jandiá, Sapucaia e Boa Vista. As crostas tanto aluminofosfáticas como ferroaluminosa-fosfáticas também encontram paralelo nos demais depósitos da região. Essas últimas se apresentam também em aspecto nodular a tipo pele-de-onça, em que os nódulos e esferólitos de hematita/goethita são cimentados pelos fosfatos de alumínio, gibbsita e caulinita.

Os minerais constituintes das duas crostas também não divergem dos presentes nos lateritos fosfáticos da região do Gurupi. Com base na mineralogia, constituídos por crandallita-goyazita, woodhouseíta-svanbergita e wardita, e na composição química das crostas, os depósitos de Serrotinho e Serrote são idênticos entre si, da mesma forma Tracuá e Caeté, composto por augelita e augelita + variscita, e, portanto, poderiam ser considerados como ligeiramente distintos entre as duas áreas. As proximidades geográficas entre Serrotinho e Serrote, e entre Tracuá e Caeté, aliadas as características acima, mostram que cada grupo constituía uma única unidade que foi separada por atividade erosiva. Isto é confirmada pelo relevo em morro, erosional, em que as crostas ferroaluminosas fosfáticas, favoreceram localmente a preservação.

Enquanto os aspectos gerais dos materiais dos saprólitos e horizonte argiloso, e até mesmo das crostas demonstrem que os dois grupos de depósitos tenham se desenvolvidos a partir de rochas aluminossilicatadas, em que quartzo e minerais de argila (primários e possivelmente também como produto de alteração intempérica de aluminossilicatos) e mica/muscovita, eram os principais constituintes, as condições de formação dos fosfatos de alumínio foram distintas, segundo as espécies de fosfatos em cada grupo. No Serrotinho-Serrote fosfatos de Ca, Sr e Na (crandallita-goyazita-woodhouseíta-svanbergita e wardita), e em Tracuá-Caeté, apenas fosfatos de alumínio, desprovidos desses elementos e prevalência de fosfato de alta (augelita) e baixa (variscita) razão $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$.

Embora uma possível fonte para o fósforo, possa ter sido apatita, ou mesmo ainda os fosfatos de alumínio presentes nas rochas metamórficas do Grupo Gurupi (Oliveira 1977), e que afloram no entorno de Santa Luzia-PA, a menos de 50 km destes depósitos (Costa *et al.* 1980), essas divergências mineralógicas entre os dois grupos de depósitos, sugerem a contribuição de minerais de cálcio, estrôncio (fosfato de Ca, tipo apatita; além de outros

minerais como feldspatos) em Serrotinho e Serrote, e a quase ausência destes em Tracuí e Caeté.

A constituição mineralógica, e parte química, de Serrotinho e Serrote permite compará-los com os depósitos de Sapucaia e Boa Vista, e mesmo Jandiá, incluindo a natureza areno-argilosa dos saprólitos e horizontes argilosos.

Deduz-se assim que pelo menos pela posição geográfica atual, esses quatro depósitos, Sapucaia, Boa Vista, Serrotinho e Serrote derivaram de uma sequência aluminossilicatada similar. Os quatro certamente deveriam ter uma expressão areal muito maior, fortemente esculpida erosão fluvial que se sucedeu, em paleocosta, por regressão do mar de Pirabas e que deixou claramente o seu registro sobre os depósitos de Sapucaia e Boa Vista. Essa forte atividade erosional alimentou a sedimentação flúvio-lacruste e parcialmente marinha que deu origem a Formação Pirabas.

Por último, admite-se que Tracuí e Caeté, do ponto de vista mineralógico e em parte químico, assemelham-se mais a Pirocaua e Cansa Perna, ambos desenvolvidos sobre sequências metavulcanossedimentares também enriquecidas em fosfatos (Costa 1982).

6 CONCLUSÃO

A descoberta de novos depósitos de fosfatos aluminosos lateríticos na região de Bonito-Ourém, dentre eles Serrotinho Serrote, Tracuí e Caeté, alguns com potencial econômico para fosfatos, ressalta a importância de estudos prospecção na região. O presente estudo constatou a presença de diferenças na mineralogia entre os perfis, inicialmente indicada por cálculos estequiométricos, assim como constatou a diversas similaridades entre os alvos de estudo com a região do Gurupi.

Em geral, os perfis lateríticos exibem espessuras variando entre 5 e 9 metros e apresentam uma estruturação típica dos lateritos maduros da Amazônia, envolvendo horizontes saprolíticos, argilosos, fosfáticos (equivalente aos aluminosos nos perfis laterítico-bauxíticos) e ferrofosfáticos (equivalentes aos horizontes ferroaluminosos), truncados ou não. Os 4 perfis podem ser agrupados e/ou diferenciados de acordo com a mineralogia fosfática predominante. Em Serrotinho e Serrote predominam fosfatos do tipo APS enquanto em Tracuí e Caeté fosfatos simples, como augelita, variscita e hidróxidos de alumínio, como a gibbsita são mais comuns. Esse mesmo padrão é observado na composição química, onde as variações dos elementos maiores, menores e traço acompanham a mineralogia fosfática presente. A assinatura geoquímica e de elementos terras raras normalizados presentes nos horizontes fosfáticos e ferrofosfáticos é similar a assinatura encontrada nos fosfatos da região do Gurupi, destacada por um enriquecimento de elementos terras raras leves em relação aos pesados. As características apresentadas por Serrotinho e Serrote associada com a pouca distância destes ao depósito de Bonito (morros Sapucaia e Boa Vista) permitem inferir que os dois alvos configurem como parte do depósito de Bonito e/ou compartilhe a mesma rocha parental. Tracuí e Caeté, entretanto, não compartilham essas características mineralógicas e químicas e, portanto, não se enquadrariam dentro desse depósito. A composição mineralógico-química desses dois alvos se assemelha mais aos dos lateritos fosfáticos desenvolvidos sobre rochas metavulcanossedimentares enriquecidas em fósforo, tal como Pirocaua e Cansa Perna.

REFERÊNCIAS

- Abram M.B., Bahiense I.C., Porto C.G., Brito R.S.C. (org). 2011. *Projeto Fosfato Brasil – Parte I*. [S.l.], Serviço Geológico do Brasil-CPRM, 526 p. Informe de Recursos Minerais. (Série Insumos Minerais para Agricultura, n. 13).
- Abram M.B., Cunha I.A., Almeida R.C. (org). 2016. *Projeto Fosfato Brasil – Parte II*. [S.l.], Serviço Geológico do Brasil-CPRM. Informe de Recursos Minerais. 1346 p. (Série Insumos Minerais para Agricultura, n. 17).
- Abreu S.F. 1937. Nota sobre os phosphatos de Trauhira (bauxita e laterita phosphorosa). *Serviço de Fomento da Produção Mineral*, **13** (4): 133-172.
- Altschuler Z.S. 1973. Weathering of phosphate deposits-geochemical and environmental aspects. In: Griffith E.J. *Environmental phosphorus handbook*. [S.l.], Wiley, p.33-96.
- Angélica R.S. & Costa M.L. 1991. Associações geoquímicas nos lateritos superficiais do Complexo de Maicuru, Estado do Pará. *Geochim. Bras.* **1** (2): 101–115.
- Araújo E.S. 1994. *Geoquímica multi-elementar de crostas e solos lateríticos da Amazônia Oriental*. PhD Thesis, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 239 p.
- Argentièrre R. 1971. Notas sobre a ilha de Trauíra. *Mineração e Metalurgia*, **54** (321): 110-112.
- Bárdossy G. & Aleva G. J. J. 1990. *Lateritic bauxites*. Amsterdam, Elsevier, 624 p.
- Bayliss P., Kolitsch U., Nickel E.H., Pring A. 2010. Alunite supergroup: recommended nomenclature. *Mineral. Mag.* **74**: 919–927.
- Brandt F. 1932. Ein neuer typ von Eisentonerdephosphat-Vorkommen (Maranhão Nordbrasilien). *Chemie der Erde*. Jena, **7**: 383-425.
- Capedcomme L. 1953. Etude minéralogique des gites de phosphatés alumineux de la région de Thiés (Sénégal). In: 11^o Session, Congr. Géol. Int. Comptes Rendus, Alger, p. 103–118.
- Correa S.L. & Costa M.L. 1997. Mineralogia das crostas lateríticas ferruginosas de Seis Lagos (Amazonas). *Geociências*, São Paulo, **16** (1), 141–156.
- Costa M.L. & Araújo E.S. 1996. Application of multi-element geochemistry in Au-phosphate-bearing lateritic crusts for identification of their parent rock. *Journal of Geochemical Exploration*, **57**: 257-272.

Costa M.L. & Costa W.A.M. 1987. Distribuição dos terras raras na solução sólida crandallita-goyazita de Sapucaia (Bonito-Pará). In: SBGq, 4º Congresso Brasileiro de Geoquímica. *Anais[...]* 1: 53-59.

Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(2): 146-160.

Costa M.L. 1984. A dinâmica de formação de lateritas: o exemplo do NE do Pará e do NW do Maranhão. In: SBG, 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro. *Anais[...]*. v.5, p. 4823-4837.

Costa M.L. 1990. Geologia, mineralogia, geoquímica e epigênese dos fosfatos lateríticos de Jandiá. *Geochimica Brasiliensis*, 4 (1): 85-110.

Costa M.L. 1980. *Geologia, mineralogia, geoquímica e gênese dos fosfatos de Jandiá, Cansa Perna, Itacupim no Pará e Trauíra e Pirocaua no Maranhão*. MS Dissertation, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 202 p.

Costa M.L. 2018. Intemperismo e depósitos minerais lateríticos no nordeste do Pará: fosfatos de alumínio, caulim e bauxita. *Boletim do Museu de Geociências da Amazônia*, 5 (3): 1-12.

Costa M.L. 2007. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. In: Licht O.A.B., Silva C.R.S., Bandeira de Melo C.S. (eds.). *Prospecção geoquímica*. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geoquímica, p. 299-344.

Costa M.L. 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Exploration Mining Geology*, 6 (1): 79-104.

Costa M.L. 1990. Mineralogia, gênese e epigênese dos lateritos fosfáticos de Jandiá, na região Bragantina (NE do Pará). *Geochim. Bras.* 4 (1): 85-110.

Costa M.L. 1982. *Petrologisch-geochemische untersuchungen zur genese der phosphate und bauxiten der region Gurupi, Ost-Amazonien, Brasilien*. PhD Thesis. Erlangen-Nürnberg Universität, Alemanha. 190 p.

Costa M.L. & Reymão M.F.F. 1984. Senegalita $Al_2(OH)_3(H_2O)(PO_4)_3$, nos fosfatos lateríticos do Pará e Maranhão (Amazônia Oriental). *Revista Brasileira de Geociências*, 14 (3): 170-174.

Costa J.L. & Ricci P.S.F. 2000. Carta geológica. In: Costa J.L. (eds.). *Folha Castanhal (SA.23-V-C)*. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Belém, Serviço Geológico do Brasil-CPRM. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

Costa M.L. & Sá J.H.S. 1980. Os fosfatos lateríticos da Amazônia Oriental: geologia, mineralogia, geoquímica e correlação com as bauxitas da Amazônia. In: SBG, 31º Congresso Brasileiro Geologia, Balneário de Camboriú, *Anais[...]*. v.3. p. 1459-1472.

Costa M.L. & Souza V.S. 1991. O encanto da crosta laterítica da Pedra Grande. In: SBG, 3º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. *Anais[...]*. p. 495-511.

Costa W.A.M., Costa M.L., Ferreira M.J.C. 1991. Espectro de minerais pesados no perfil laterítico fosfático de Sapucaia (nordeste do Pará). In: SBG, 3º Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém-Pará. *Anais[...]*. v.1, p. 512-526.

Costa M.L., Costa W.A.M., Schwab R.G. 1980. Mineralogia das ocorrências de fosfatos lateríticos do Pará e Maranhão (Brasil). In: SBG, 31º Congresso Brasileiro Geologia, Balneário de Camboriú, *Anais[...]*. v.4, p. 1982-1996.

Costa M.L., Leite A. S., Pöllmann H. 2016. A laterite-hosted APS deposit in the Amazon region, Brazil: The physical-chemical regime and environment of formation. *Journal of Geochemical Exploration*, **170**: 107-124.

Costa J.L., Boas J.M.V., Pastana J.M.V., Wanderley V.J.R., Araújo A.A.F., Frizzo S.J. 1975. *Projeto Gurupi. Relatório Preliminar*. Belém, DNPM/CPRM, 1, 251 p.

Costa J.L., Boas J.M.V., Wanderley V.J.R., Araújo A.A.F., Frizzo S.J. 1977. *Projeto Gurupi. Relatório Final*. Belém, DNPM/CPRM, v.1, 258 p.

Costa M.L., Cruz G.S., Almeida H.D.F., Pöllmann H. 2014. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: evidence of genetic relationships. *J. Geochem. Explor.* **146**: 58-74.

Costa M.L., Fernández O.C., Toledo M.C.M., Passos C.M., Pereira P.F. 2004. A turquesa de Itacupim, Pará. *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto*, **57**: 261-266.

Costa M.L., Fonseca L.R., Lemos V.P., Angélica R.S., 1991. Geochemical Exploration of the Maicuru Ultramafic-Alkaline-Carbonatite complex, Northern Brazil. *J. Geochem. Explor.*, **40**: 193-204.

Costa M.L., Leite A.S., Kaden R., Poellmann H., Botelho N.F., Santos D.C. 2020. A fluor-poor wavellite in phosphate-rich iron crusts in Amazon. *BOMGEAM*, **7** (1): 1-14 p.

Costa M.L., Valente G.J.S.S., Queiroz A.F.S., Santos P.H.C. 2018. Fosfatos verdes da crosta ferro-aluminosa-fosfática da mina de fosfatos de alumínio de Bonito (Pará). *Boletim do Museu de Geociências da Amazônia*. **5** (3): 1-12.

Damasceno E.C. 1989. Patos de minas phosphate deposit, Minas Gerais, Brasil. In: Notholt A.J.G., Sheldon R.P., Davidson D.F. (eds.). *Phosphate deposits of the world*. London, Cambridge, University Press, p. 100-103.

Dill H.G. 2001. The geology of aluminum phosphates and sulphates of the alunite group minerals: a review. *Earth-Sci. Rev.* **53**: 35-93.

Dill H.G. 2003. A comparative study of APS mineral of the Pacific Rim fold belts with special reference to South American argillaceous deposits. *Journal of South American Earth Sciences*, **16**: 301-320.

- Erdosh G. 1979. The ontario carbonatite province and phosphate potential. *Economic Geology*, **74**: 331–338.
- Finch R.J. & Hanchar J.M. 2003. Structure and chemistry of zircon and zircon-group minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **53**(1): 1-25.
- Flicoteaux R. & Lucas J. 1984. Weathering of phosphate minerals. In: Nriagu J.O. & Moore P.B. (eds.). *Phosphate minerals*. Berlin, Springer, p. 292–317.
- Francisco E.A.B. 2006. *Fosfatos aluminosos do grupo da crandallita como fonte alternativa de fósforo para a cultura do arroz*. PhD Theses, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 145 p.
- Freitas S.C.M. 2009. *Fosfato aluminoso da ilha de Trauíra como fonte alternativa de fosfato para a agricultura familiar do Maranhão*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, Universidade Estadual do Maranhão, 26 p.
- Freyssinet P.H., Butt C.R.M., Morris R.C., Piantone P. 2005. Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Econ. Geol. Anniversary* **100**: 681–722.
- Gaboreau S., Beaufort D., Vieillard P., Patrier P., Bruneton P., 2005. Aluminum phosphatesulfate minerals associated with Proterozoic unconformity-type uranium deposits in the East Alligator River Uranium Field, Northern Territories, Australia. *The Canadian Mineralogist*, **43**: 813–827.
- Galán-Abellán A.B., Barrenechea J.F., Benito M.I., Horra R.de la, Luque F.J., Alonso-Azcárate J., Arche A., López-Gómez J., Lago M. 2013a. Palaeoenvironmental implications of aluminium phosphate–sulphate minerals in Early–Middle Triassic continental sediments, SE Iberian Range (Spain). *Sediment. Geol.* **289**: 169–181.
- Giovannini A.L., Bastos Neto A.C., Porto C.G., Pereira V.P., Takehara L., Barbanson L., Bastos P.H.S. 2017. Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil). *Ore Geology Reviews*, **88**: 461-480.
- Gonçalves D.F. & Kotschoubey B. 2001. Caracterização e gênese da cobertura laterítica fosfática do morro Jandiá – NE do estado do Pará. In: SBG/NO, 7º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. *Anais[...]*. v.1, p. 62-65.
- Klein E.L. 2011. Depósitos de fosfatos aluminosos do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão. In: Abram M.B., Bahiense I.C., Porto C.G., Brito R.S.C. 2011. *Projeto Fosfato Brasil – Parte I*. Salvador, Serviço Geológico do Brasil-CPRM. Informe de Recursos Minerais, 529 p. (Série Insumos para a Agricultura, 13).
- Klein E.L., Lopes E.C.S., Rodrigues J.B., Souza-Gaia S.M., Cordani U.G. 2020. Rhyacian and Neoproterozoic magmatic associations of the Gurupi Belt, Brazil: Implications for the tectonic evolution, and regional correlations. *Geoscience Frontiers* **11**: 2243–2269.
- Klein E.L. & Moura C.A.V. 2003. Síntese geológica e geocronológica do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi na região do rio Gurupi (NE-Pará/NW-Maranhão). *Revista Geologia USP, Série Científica* **3**: 97–112.

Lagler B., Tedesco M.A., Oliveira A.S.D, Juliani C., Waring M.H. 2016. Geologia do Depósito de fosfato Serra Da Capivara, município de São Félix do Xingu, Pará. *In: Abram M.B. (eds.). Projeto Fosfato Brasil – Parte II.* Salvador, Bahia, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, p. 464-478.

Lemos V.P. & Costa M.L. 1987. Partição dos Terras Raras nos Lateritos Fosfáticos de Maicuru. *In: SBGq 1º Congresso Brasileiro de Geoquímica.* Porto Alegre, *Anais[...]*. p. 83–102.

MbAC Fertilizer Corporation. 2013. *Feasibility study (FS) Santana Phosphate Project Pará State, Brazil.* [S.l., s.n]. 278p. Disponível em: https://itafos.com/site/assets/files/1763/itafos-santana_technical_report_vfinal.pdf.

Misi, A., Azmy, K., Kaufman, A.J., Oliveira, T.F., Sanches, A.L., Oliveira, G.D., 2014. Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brasil: implications to metallogenic and phosphogenic models. *Ore Geol. Rev.* 63, 76–90.

Monteiro R.W. & Oliveira N.P. 1984. Estudo de solubilidade dos fosfatos de Pirocaua e Trauíra (MA) e Itacupim e Jandiá (PA) a diferentes temperaturas, visando seu aproveitamento agrícola. *In: Oliveira N. P. & Costa M. L. Os fosfatos aluminosos do Pará e do Maranhão: estágio atual de conhecimentos e estratégia para o aproveitamento econômico. Ciências da Terra*, 10:16-19

Mordberg L.E., Stanley C.J., Gernann K. 2000. Rare earth element anomalies in crandallite group minerals from Schugorsk bauxite deposit, Timan, Russia. *Eur. J. Mineral.*, 12: 1229-1243.

Nriagu J.O. 1976. Phosphate-clay mineral relations in soils and sediments. *Canadian Journal of Earth Science* 13: 717–736.

Oliveira N.P. 1977. *Fosfatos da região de Santa Luzia.* MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, 74 p.

Oliveira N.P. 1980. *Mineralogie und Geochemie der phosphatführenden Laterite von Itacupim und Trauíra Nordbrasilien.* PhD Thesis. Erlangen-Nürnberg Universitat, Alemanha.

Oliveira N.P. & Costa M. L. 1984. Os fosfatos aluminosos do Pará e Maranhão; estágio atual do conhecimento e estratégia para o aproveitamento econômico. *Ciências da Terra, Brasil*, 10: 10-16.

Oliveira R.S. & Truckenbrodt W. 2019. Provenance and diagenesis of Guamá Sandstone, northeastern Pará, Brazil: A Silurian link between the Amazonas and Parnaíba basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 90: 265–281. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.014>.

Oliveira N.P. & Schwab R.G. 1980. Itacupim: um exemplo da influência do fósforo no desenvolvimento de perfis lateríticos. In: SBG, 31º Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú-SC. *Anais[...]*. v.1, p. 184-196.

Pe-Piper G. & Dolansky L.M. 2005. Early diagenetic origin of Al phosphate-sulphate minerals (woodhouseite and crandallite series) in terrestrial sandstones, Nova Scotia, Canada. *American Mineralogist* **90**: 1434–1441.

Pöllmann H. 2010. *Mineralisation of wastes and industrial residues*. Aachen, Shaker Vlg.

Pöllmann H. & Heimann R. B. 2012. The use of apatite minerals for immobilization purposes. In: Heimann Robert B. (ed.). *Calcium phosphate: structure, synthesis, properties, and applications*. New York, Nova science Publisher, p. 409–445.

Rabello C.Q. 1945. Bauxita fosforosa de Pirocaua, Turiaçu, Maranhão. *Mineração e Metalurgia* **9** (51): 123-126.

Ramos C.G., Medeiros D.dos S., Gomez L., Oliveira L.F.S., Schneider I.A.H., Kautzmann R.M. 2019. Evaluation of Soil Re-mineralizer from By-Product of Volcanic Rock Mining: Experimental Proof Using Black Oats and Maize Crops. *Natural Resources Research*, New York, N.Y., **28**: 1-18.

Rasmussen B. 1996. Early-diagenetic REE-Phosphate minerals (florencite, gorceixite, crandallite, and xenotime) in marine sandstones: a major sink for oceanic phosphorus. *American Journal of Science* **296**: 601–632

Ricci P.S.F. & Costa J.L. 2000. Estratigrafia. In: Costa J.L. (eds.). *Folha castanhal (SA.23-V-C). Estado do Pará*. Escala 1:250.000. Nota Explicativa (consulta on line). Belém, Serviço Geológico do Brasil-CPRM. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

Roncal-Herrero T. & Oelkers E.H. 2011. Does variscite control phosphate availability in acidic natural waters? An experimental study of variscite dissolution rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **75**: 416–426.

Rossetti D.F. 2006. Evolução sedimentar miocênica nos Estados do Pará e Maranhão. *Geologia USP. Série Científica* **6** (2): 7–18. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300003>.

Rossetti D.F. 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, **14**: 77–89.

Rossetti D.F. & Góes A.M. 2004. *O Neógeno da Amazônia Oriental*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, 225p. (Coleção Friedrich Katzer.).

Rossetti D.F., Bezerra F.H.R., Dominguez J.M.L. 2013. Late Oligocene–Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. *Earth Sci. Rev.* **123**: 87–112. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.005>.

Sakamoto T. & Vargas L.F.C. 1959. Relatório preliminar sobre o depósito de bauxita fosfatada, no Morro de Pirocaua, município de Cândido Mendes, Estado do Maranhão. In: Pantolfo C. M. *Notas sobre os depósitos de evaporitos da Bacia amazônica, minério de baixita fosforosa do Maranhão e reconhecimento geológicos em áreas do estado do*

Amazonas e territórios de Rio Branco e Rondônia. Belém, S.P.V.EA, v.2, p. 91-121. (Série Recursos Naturais, 5).

Salama W. 2014. Paleoenvironmental significance of aluminum phosphate-sulfate minerals in the upper Cretaceous ooidal ironstones, E-NE Aswan area, southern Egypt. *Int. J. Earth Sci.* **103**: 1621–1639. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1027-4>.

Santos D. C. 2019. *Gamaespectrometria aplicada à prospecção de fosfatos lateríticos na região do Gurupi – NE do Pará e NW do Maranhão*. DS Dissertation, PPGABFM/FGEL/UERG, 76p.

Santos H.G. 2011. *O novo mapa de solos do Brasil*. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. 67 p.

Schellmann W. 1980. On the geochemistry of laterites. *Chem. Erde* **45**: 39–52.

Schellmann W. 1994. Geochemical differentiation in laterite and bauxite. Formation. *Catena*, **21**: 131–143.

Schwab R. G., Pimpl T., Schukow H., Stolle A., Breiting D. K. 2004. Compounds of the crandallite-type: Synthesis, properties and thermodynamic data of pure crandallite and woodhouseite. *N. Jb. Miner. Mh. Jg.* (9): 385–409.

Schwab R.G., Herold H., Costa M.L., Oliveira N.P. 1989. The formation of aluminous phosphates through lateritic weathering of rocks. In: Balasubramanian K.S. & Evangelov V.P. (eds.). *Weathering: its products and deposits 2*. Theophrastus, Athens, p. 369–386.

Schwertmann U. & Pfab G. 1994. Structural vanadium in synthetic goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58** (20): 4349-4352. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90338-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90338-7).

Scott K.M. 1987a. Solid solution in, and classification of gossan-derived members of the alunite–jarosite family, Northwest Queensland, Australia. *American Mineralogist*, **72**: 178–187.

Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos - SAE. 2020. *Produção Nacional de Fertilizantes*. Estudo Estratégico. Diretoria de Projetos Estratégicos, 23 p.

Silva M.C., Costa F.R., Leandro W.M., Lima Junior A.F., Brito G.S., Silva L.R. 2015. Eficiência de uso de termofosfato de alumínio como fonte de fósforo na produção de feijão, em solo incubado. *Revista Faculdade Montes Belos (FMB)*, **8** (5): 1-19.

Siqueira, N.V.M. 1982. *O padrão de distribuição dos elementos principais e traços nas lateritas fosfatadas da Chapada de Pirocaua (MA)*. MS Dissertation. Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas. Universidade Federal do Pará, Belém, 211 p.

Sousa W.S.P., Kotschoubey B., Silva E.R.P. 2003. Lateritas fosfáticas da região de Bonito, NE do Pará: Caracterização e gênese. In: SBGq, 9º Congresso Brasileiro de Geoquímica, Belém. *Anais[...]*. v.1, p. 271-273.

Spier C.A., Kumara A., Nunes A.P.L. 2020. Mineralogy and genesis of rare Al-phosphate minerals in weathered itabirite and iron ore from the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, **118**: 1-19.

Stoffregen R.E., Rye R.O., Wasserman M.D. 1994. Experimental studies of alunite: I 18O and D–H fractionation factors between alunite and water at 250–450°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**: 903–916.

Stumm W. & Morgan J. J. 1996. *Aquatic chemistry, chemical equilibria and rates in natural waters*. third ed. New York, John Wiley and Sons Inc.,

Theodoro S.H., Leonardos O.H., Rocha E.L., Macedo I., Rego K. 2013. Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study of remineralization of the Tucuruí degraded land for agroforest reclamation. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **85** (1): 23–34.

Toledo M.C.M., Ferrari V.C., Alcover Neto A., Fontan F., Martin F., Santos C.N., Carvalho F.M.S. 2002. Fosfatos aluminosos com ferro do grupo da crandalita nas coberturas lateríticas de Catalão I, Juquiá e Tapira (Brasil) e Chiriguelo (Paraguai). *Rev. Bras. Geosci.*, **32** (4), 393–406.

Toledo M.C.M., Oliveira S.M.B., Costa M.L., Passos C.M., Almeida H.D.F. 2006. Evolução do manto de intemperismo laterítico rico em fosfatos da ilha de Itacupim (PA) – mineralogia, micromorfologia e geoquímica. *Pesquisas em Geociências*, Instituto de Geociências/UFRGS, **33** (2): 109-122.

Valeton I. 1994. Element concentration and formation of ore deposits by weathering. *Catena*, **21**: 99-129.

Vieillard P., Tardy Y., Nahon D. 1979. Stability fields and aluminum phosphates: paragenesis in lateritic weathering of argillaceous phosphatic sediments. *American Mineralogist*, **64**: 626–634.

Vircava I., Somelar P., Liivamägi S., Kirs J., Kirsimäe K. 2015. Origin and paleoenvironmental interpretation of aluminum phosphate–sulfate minerals in a Neoproterozoic Baltic paleosol. *Sed. Geol.*, **319**: 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.02.003>.