



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 438

**GEOLOGIA, MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DOS FOSFATOS
DE SAPUCAIA (BONITO-PA)**

Dissertação apresentada por:

ALESSANDRO SABÁ LEITE

Orientador: Prof. Marcondes Lima da Costa (UFPA)

**BELÉM
2014**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
(Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA)

Leite, Alessandro Sabá, 1979-
Geologia, mineralogia e geoquímica dos fosfatos de Sapucaia
(Bonito-Pa) / Alessandro Sabá Leite. – 2014.
xvi, 94 f.: il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marcondes Lima da Costa
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto
de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e
Geoquímica, Belém, 2014.

1. Fosfatos - Bonito (PA). 2. Laterita - Bonito (PA). 3.
Intemperismo - Bonito (PA). I. Título.

CDD 22. ed. 553.64098115



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

**GEOLOGIA, MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DOS
FOSFATOS DE SAPUCAIA (BONITO-PA)**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
ALESSADRO SABÁ LEITE

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.**

Data de Aprovação: 20 / 10 / 2014

Banca Examinadora:

Prof. Marcondes Lima da Costa
(Orientador-UFPA)

Prof. Herbert Poellmann
(Membro Martin Luther University of Halle - Wittenberg)

Prof.ª Sônia Maria Barros de Oliveira
(Membro-USP)

A DEUS, FORÇA ABSOLUTA DE AMOR E COMPAIXÃO
AO MEU ORIENTADOR E AMIGO, *HERR PROFESSOR* MARCONDES LIMA DA COSTA
A UMA AMIGA VERDADEIRA, GEÓLOGA GISELE TAVARES MARQUES

AGRADECIMENTOS

Deus, meu fiel companheiro, por me conceder força, esperança e saúde em momentos nos quais pequenas vírgulas se assemelharam a pontos finais, e que junto a minha amada família e aos meus companheiros de caminhada, atenuaram a dor da saudade.

Meu grande incentivador e amigo, cuja fidelidade de sua crença em meus esforços, tornou possível a execução deste trabalho, Professor Doutor Marcondes Lima da Costa.

Geóloga Gisele Tavares Marques, pelos conselhos, revisões, sugestões, inúmeras horas de debate e valorosa amizade oferecida nos momentos decisivos para a execução deste trabalho.

Empresas Fosfatar Mineração e Rio Verde Minerals, em especial a Leonardo Marques, Leonel de Deus, Aldoir Noronha e Dr. Daniel Diliz pela oportunidade de desenvolvimento do primeiro projeto mineral no Brasil de produção de termofosfatos. E ainda pela experiência adquirida em todos os grandes desafios.

GEOCIAM, pelo auxílio financeiro concedido para a execução da metodologia executada durante a pesquisa;

Laboratórios do Instituto de Geociências da UFPA, em especial, Laboratório de Caracterização Mineral, Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV e LaMiGA), Laboratório de Petrografia PPGG, Laboratório de Sedimentologia (GSED) e Laboratório de Gemologia, oficinas de preparação de amostras e de laminação, e seus respectivos colaboradores;

Amigos do Museu de Geociências, seus “doutorandos”, “mestrandos” e “graduandos”; em especial a Msc. Gisele Marques e Msc. Mônia Carvalho, companheiras mestrandas; Dra. Flávia Rodrigues, Msc. Henrique Diniz, Msc. Sauri Machado e Thiago Souza, por suas inestimáveis contribuições.

Aluno do programa de Iniciação Científica SESu/MEC, Pablio Henrique Santos pela colaboração na caracterização do caulim de Sapucaia e em publicações científicas.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.

Charles Chaplin

RESUMO

O depósito mineral de Sapucaia, situado no município de Bonito, região nordeste do Estado do Pará, é parte de um conjunto de ocorrências de fosfatos de alumínio lateríticos localizados predominantemente ao longo da zona costeira dos estados do Pará e Maranhão. Estes depósitos foram alvos de estudo desde o início do século passado, quando as primeiras descrições de “bauxitas fosforosas” foram mencionadas na região NW do Maranhão. Nas últimas décadas, com o crescimento acentuado da demanda por produtos fertilizantes pelo mercado agrícola mundial, diversos projetos de exploração mineral foram iniciados ou tiveram seus recursos ampliados no território brasileiro, dentre estes destaca-se a viabilização econômica de depósitos de fosfatos aluminosos, como o de Sapucaia, que vem a ser o primeiro projeto econômico mineral de produção e comercialização de termofosfatos do Brasil. Este trabalho teve como principal objetivo caracterizar a geologia, a constituição mineralógica e a geoquímica do perfil laterítico alumino-fosfático do morro Sapucaia. A macrorregião abrange terrenos dominados em sua maioria por rochas pré-cambrianas a paleozóicas, localmente definidas pela Formação Pirabas, Formação Barreiras, Latossolos e sedimentos recentes. A morfologia do depósito é caracterizada por um discreto morrote alongado que apresenta suaves e contínuos declives em suas bordas, e que tornam raras as exposições naturais dos horizontes do perfil laterítico. Desta forma, a metodologia aplicada para a caracterização do depósito tomou como base o programa de pesquisa geológica executada pela Fosfatar Mineração, até então detentora dos respectivos direitos minerais, onde foram disponibilizadas duas trincheiras e amostras de 8 testemunhos de sondagem. A amostragem limitou-se à extensão litológica do perfil laterítico, com a seleção de 44 amostras em intervalos médios de 1m, e que foram submetidas a uma rota de preparação e análise em laboratório. Em consonância com as demais ocorrências da região do Gurupi, os fosfatos de Sapucaia constituem um horizonte individualizado, de geometria predominantemente tabular, denominado simplesmente de horizonte de fosfatos de alumínio ou crosta aluminofosfática, que varia texturalmente de maciça a cavernosa, porosa a microporosa, que para o topo grada para uma crosta ferroalumino fosfática, tipo pele-de-onça, compacta a cavernosa, composta por nódulos de hematita e/ou goethita cimentados por fosfatos de alumínio, com características similares aos do horizonte de fosfatos subjacente. A crosta aluminofosfática, para a base do perfil, grada para um espesso horizonte argiloso caulínico com níveis arenosos, que repousa sobre sedimentos heterolíticos intemperizados de granulação fina, aspecto argiloso, por vezes sericítico, intercalados por horizontes arenosos, e que não possuem correlação aparente com as demais rochas aflorantes da geologia na região.

Aproximadamente 40% da superfície do morro é encoberta por colúvio composto por fragmentos mineralizados da crosta e por sedimentos arenosos da Formação Barreiras. Na crosta, os fosfatos de alumínio estão representados predominantemente pelo subgrupo da crandallita: i) série crandallita-goyazita (média de 57,3%); ii) woodhouseíta-svanbergita (média de 15,8%); e pela iii) wardita-millisita (média de 5,1%). Associados aos fosfatos encontram-se hematita, goethita, quartzo, caulinita, muscovita e anatásio, com volumes que variam segundo o horizonte laterítico correspondente. Como os minerais pesados em nível acessório a raro estão zircão, estauroлита, turmalina, anatásio, andalusita e silimanita. O horizonte de fosfatos, bem como a crosta ferroalumínio-fosfática, mostra-se claramente rica em P_2O_5 , além de Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , SrO , SO_3 , Th , Ta e em terras-raras leves como La e Ce em relação ao horizonte saprolítico. Os teores de SiO_2 são consideravelmente elevados, porém muito inferiores aqueles identificados no horizonte argiloso sotoposto. No perfil como um todo, observa-se uma correlação inversa entre SiO_2 e Al_2O_3 ; entre Al_2O_3 e Fe_2O_3 , e positiva entre SiO_2 e Fe_2O_3 , que ratificam a natureza laterítica do perfil. Diferente do que é esperado para lateritos bauxíticos, os teores de P_2O_5 , CaO , Na_2O , SrO e SO_3 são fortemente elevados, concentrações consideradas típicas de depósitos de fosfatos de alumínio ricos em crandallita-goyazita e woodhouseíta-svanbergita. A sucessão dos horizontes, sua composição mineralógica, e os padrões geoquímicos permitem correlacionar o presente depósito com os demais fosfatos de alumínio da região, mais especificamente Jandiá (Pará) e Trauíra (Maranhão), bem como outros situados além do território brasileiro, indicando portanto, que os fosfatos de alumínio de Sapucaia são produtos da gênese de um perfil laterítico maturo e completo, cuja rocha fonte pode estar relacionada a rochas mineralizadas em fósforo, tais como as observadas na Formação Pimenteiras, parcialmente aflorante na borda da Bacia do Parnaíba. Possivelmente, o atual corpo de minério integrou a paleocosta do mar de Pirabas, uma vez que furos de sondagem às proximidades do corpo deixaram claro a relação de contato lateral entre estas unidades.

Palavras-chave: Intemperismo, Laterito, Fosfato, Sapucaia, Crandallita-goyazita.

ABSTRACT

The mineral deposit of Sapucaia, located in Bonito county, northeast of Pará state, is part of a set of occurrences of lateritic aluminum phosphates located predominantly along the coastal area of Pará and Maranhão states. These deposits were subject for study since the beginning of the last century, when the first descriptions of "phosphorous bauxites" were mentioned in the NW region in Maranhão. In the last decades, with the increase demand for fertilized products for agricultural world market, various mineral exploration projects were started or expanded their resources in Brazilian territory, among them there is the economic viability of deposits of aluminous phosphates, as Sapucaia, which will be the first project of economic mineral production and marketing of thermophosphates of Brazil. This study aimed to characterize the geology, mineral composition and geochemistry of lateritic aluminum phosphates profile of the Sapucaia hill. The macro-region included lands mostly dominated by Precambrian to Paleozoic rocks land, locally defined by Pirabas Formation, Barreiras Formation, latosols and recent sediments. The morphology of the deposit is characterized by a discrete elongated hillock that offers smooth and continuous slopes at its edges, which become rare natural exposures of the laterite profile horizons. So, the methodology used to characterize the deposit was based on the program of geological research performed by "Fosfatar Mining", hitherto owns their mineral rights, has provide two trenches and samples of 8 drill cores. Sampling was limited to the extent of lithological lateritic profile, with the selection of 44 samples at intervals of 1m, and underwent a course of preparation and laboratory analysis. According with the other occurrences of the Gurupi region, the phosphates of Sapucaia contains an individualized horizon, called simply aluminum phosphates or aluminophosphatic crust, which varies texturally to massive horizon, cavernous, porous microporous, which to the top transitions to phosphate ferroaluminous crust, "leopard skin", cavernous, composed of nodules of hematite and / or goethite cemented by aluminum phosphates, with similar characteristics to the underlying phosphate horizon. The aluminophosphatic crust to the base of the profile transition to a thick horizon kaolinitic clay with sand layers, which rests on weathered heterolithic fine-grained sediments, sericite clay aspect, sometimes interspersed with sandy horizons, and have no apparent correlation with other rocks outcrop in the region. Approximately 40% of the surface of the hill is covered by colluvium composed of mineralized fragments of the crust and sandy sediment from Barreira Formation. In the crust, the aluminum phosphates are predominantly represented by the subgroup of crandallite: i) Crandallite-goyazite (average 57.3%); ii) woodhouseite-svanbergite (average 15.8%); and iii) wardite-millisite (average 5.1%).

Associated with phosphates are: hematite, goethite, quartz, kaolinite, muscovite and anatase, with volumes that vary according to the corresponding laterite horizon. As the heavy minerals in the accessory level are zircon, staurolite, tourmaline, anatase, andalusite and sillimanite. The horizon of phosphates and iron phosphate crusts shows be clearly rich in P_2O_5 , and Fe_2O_3 , CaO, Na_2O , SrO, SO_3 , Th, Ta and LREE such as La and Ce relative to the horizon saprolite. The contents of SiO_2 are pretty high, but much lower than those identified in lower clay horizon. In profile as a whole, there is an inverse correlation between SiO_2 and Al_2O_3 , between Al_2O_3 and Fe_2O_3 , and positive between SiO_2 and Fe_2O_3 , which confirms the nature of the lateritic profile. Different from what is expected by bauxitic laterites, the content of P_2O_5 , CaO, Na_2O , SrO and SO_3 have a elevated concentration, considered typical of phosphate deposits of aluminum rich in crandallite-goyazite and woodhouseite-svanbergite. The succession of horizons, the mineralogical composition and geochemical patterns allow correlating the deposit with other aluminum phosphates presents in the region, more specifically Jandiá (Pará) and Trauíra (Maranhão), as well as others located beyond the Brazilian territory, thus indicating that the aluminum phosphates of Sapucaia are the genesis of a lateritic mature and a complete profile, products whose source rock may be related to mineralized rocks in phosphorus, such as those observed in Pimenteiras Formation, partially outcropping on the edge of the Parnaíba Basin. Possibly, the current ore body was integrated of Pirabas paleocost sea, since drill holes on the side of the body, made clear the relationship of lateral contact between these units.

Keywords: Weathering, Laterite, Phosphate, Sapucaia, Crandallite-goyazite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – Mapa geográfico da região Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão, mostrando a localização das ocorrências e depósitos de fosfatos de alumínio, com ênfase na jazida de Sapucaia e Boa Vista, Bonito, Pará. Modificado de Costa & Sá, 1980; Costa, 1980; Costa, 1990.....	8
Figura 2 – Mapa topográfico ilustrando a posição coincidente no intervalo de cotas dos depósitos de fosfatos de alumínio lateríticos de Sapucaia (amarelo) e Boa Vista (verde) em relação ao nível do mar (0,0m).....	9
Figura 3 – Coluna estratigráfica proposta por Vasquez & Rosa-Costa (2008) para a região nordeste do estado do Pará.....	12
Figura 4 – Mapa geológico regional modificado da Folha Castanhal (SA.23-V-C) de Costa, 2000. Notar indicação da unidade Laterito Maduro (Tlm) em suas respectivas áreas de ocorrência. A Formação Pirabas (Tlp) indicada no mapa é aflorante a subaflorante.....	13
Figura 5 – Mapa topográfico de Sapucaia com a localização dos furos de sondagem (A) e trincheiras 1 e 2 (B) utilizados para as descrições litológicas.....	16
Figura 6 – Fluxograma da rota de preparação de amostras e das análises realizadas.....	17
Figura 7 – Fluxograma ilustrando o cálculo estequiométrico das principais fases minerais nas amostras analisadas.....	19
Figura 8 – Mapa geológico para a região do entorno dos depósitos de fosfatos de alumínio de Sapucaia e Boa Vista, modificado a partir da Folha Castanhal (SA.23-V-C) de Costa, 2000 e de atividades de campo do autor deste trabalho. Seta 1 indica o depósito de fosfatos de Sapucaia, correspondente à formação laterítica madura completa e, seta 2 o depósito de fosfatos de Boa Vista, correlacionável a Sapucaia. Tlp: Formação Pirabas Sub-aflorante, atingida por alguns furos de sondagens na borda dos morros.....	21
Figura 9 – Amostras retiradas de testemunhos de sondagem da jazida de Sapucaia: 1) Horizonte saprolítico dominado por material arenoso quartzoso; 2) Material argiloso marrom a violáceo e ferruginoso com plaquetas frequentes de muscovita; 3) Zona caulínica formada principalmente por caulinita, além de quartzo e muscovita, normalmente logo acima da zona argilosa violácea; 4) Calcário argiloso fossilífero (Ordem Ostreóida) da Formação Pirabas.....	24
Figura 10 – Mapa litológico ilustrando a distribuição em superfície dos horizontes lateríticos que formam o Morro Sapucaia, com encostas mais suaves a leste e mais abruptas a oeste. Ao norte, a crosta aluminofosfática e sedimentos da Formação Barreiras foram expostos devido as escavações das obras civis ligadas a mina.....	25

Figura 11 – Vista do depósito de fosfatos de Sapucaia, destacando a expressiva cobertura sedimentar (interpretada como Formação Barreiras) lateritizada na fase imatura e então transformada parcialmente em latossolos arenosos amarelos. Aqui o minério fosfatado é o substrato dos sedimentos da Formação Barreiras e aflora na base da escavação feita pela retroescavadeira.....	26
Figura 12 – Seções geológicas da sucessão de horizontes do perfil laterítico de Sapucaia e coberturas, e sua situação espacial apresentada no mapa topográfico.....	28
Figura 13 – Imagens de diferentes exposições dos fosfatos do depósito do morro Sapucaia. A) Afloramento natural da crosta fosfática, cuja ocorrência é rara. B e C) Trincheiras localizadas na borda do morro Sapucaia, onde são expostas a cobertura detrítica e o topo do horizonte fosfático, de fosfatos de alumínio.....	29
Figura 14 – A) Vista geral da área da jazida de fosfatos de Sapucaia, em que uma trincheira expõe a crosta fosfática recoberta por colúvios e pelos sedimentos da Formação Barreiras; B) A crosta fosfática maciça a cavernosa cinza a amarela; C) Detalhe da crosta fosfática anterior; D) Outro detalhe da crosta fosfática semelhante ao calcário Pirabas (Imagens: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa).....	30
Figura 15 – Aspectos texturais da crosta ferro-aluminosa fosfática do Morro Sapucaia. A) Com textura tipo pele-de-onça; B) Detalhe da textura pele-de-onça; C) Cavidade centimétrica ao centro com cristais milimétricos de fosfatos de alumínio; D) Cavidades centimétricas revestidas por microcristais de fosfatos e hidróxidos de ferro (Imagens: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa).....	30
Figura 16 – Exemplo de colúvios (3) formados por fragmentos de crosta fosfática depositados tanto sobre a crosta fosfática (1) como sobre os sedimentos heterolíticos da Formação Barreiras (2).....	31
Figura 17 – Exposições da Formação Barreiras no morro Sapucaia mostrando seus diferentes aspectos litológicos, intercalações e alteração laterítica imatura, os quais recobrem parcialmente os fosfatos. 1) Visão panorâmica de escavação na face norte da jazida; 2) Detalhe: Sucessão de argilitos a siltitos laminados, esbranquiçados, caulíníticos na base (C), sucedidos por ritmitos de arenitos e argilitos marrons avermelhados, equivalente ao horizonte mosqueado (B2); que converte gradualmente (B1) para arenitos argilosos enriquecidos em oxihidróxidos de ferro, na forma de “concreções lamelares” nos contatos litológicos e ainda como concreções, correspondendo ao horizonte ferruginoso de laterito imaturo (A); solos arenoargilosos recobrem parcialmente o horizonte ferruginoso; 3) Detalhe do contato entre os horizontes mosqueado e ferruginoso; 4) Detalhe da faixa de contato entre a zona caulínítica e os ritmitos mosqueados.....	32
Figura 18 – Difrátograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-17 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisita; Ana: anatósio.....	35
Figura 19 – Difrátograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-24 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisita; Ana: anatósio.....	36

Figura 20 – Difratoograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-28 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisita; Ana: anatásio.....	37
Figura 21 – Difratoograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-30 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisita; Ana: anatásio.....	38
Figura 22 – Difratoograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-40 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisita; Ana: anatásio.....	39
Figura 23 – Distribuição quantitativa dos minerais na zona mineralizada em fosfatos na porção superior dos perfis dos furos de sondagem SDP-07D, SPD-11 e SPD-17.....	40
Figura 24 - Distribuição quantitativa dos minerais na zona mineralizada em fosfatos na porção superior dos perfis dos furos de sondagem SDP-24, SPD-28 e SPD-30.....	41
Figura 25 – Distribuição quantitativa dos minerais na zona mineralizada em fosfatos na porção superior dos perfis dos furos de sondagem SDP-40 e SPD-41.....	42
Figura 26 – Fotomicrografias obtidas com estereomicroscópio da Crosta Fosfática (CF), perfil SPD-30, ressaltando a textura maciça e localmente cavernosa. É possível observar grãos de quartzo imersos na matriz fosfática.....	43
Figura 27 - Fotomicrografias em lâminas delgadas de amostras da Crosta Ferroaluminosa Fosfática (A-B) e Crosta Fosfática (C-H). Cr-Gy: Crandallita-goyazita; Qtz: Quartzo; Zr: Zircão; Tr: Turmalina; Msc: Muscovita.....	44
Figura 28 – Fotomicrografias de microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários. A-C) Diferentes cristallitos de crandallita-goyazita que compõem a matriz aluminofosfática; D) Textura porosa comum na crosta fosfática, em níveis de maior dissolução dos grãos de quartzo; E) Grãos de quartzo envoltos a matriz aluminofosfática. Amostra SPD-30-C.....	45
Figura 29 – Fotomicrografias de microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários. A) Muscovita com crescimento secundário de fosfatos de alumínio entre os planos de clivagem; B) Caulinita; C) Grão de quartzo no interior de cavidade na matriz predominantemente fosfática; D) Molde formado por plasma aluminofosfático.....	46
Figura 30 – Diagramas ternários $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$, $\text{CaO-SrO-P}_2\text{O}_5$, Zr-Ba-REE, Ti-Zr-REE e V-Cr-Ga para amostras do perfil laterítico de Sapucaia, segundo horizontes lateríticos definidos.....	51
Figura 31 – Distribuição das concentrações (médias) de elementos maiores, menores e traços no perfil laterítico e sua cobertura detrítica mineralizada do morro Sapucaia.....	52
Figura 32 - Distribuição comparativa entre as concentrações dos elementos químicos (ppm) segundo cada associação geoquímica para cada horizonte do perfil e sua cobertura (associações inferidas a partir dessas concentrações). Os elementos maiores e menores estão representados em seus respectivos óxidos: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, SrO, MgO, K_2O , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 e SO_3	53

Figura 33 – Matriz de correlação para a crosta laterítica fosfática do morro Sapucaia.....	55
Figura 34 – Diagramas de dispersão para pares de elementos químicos indicativos de evolução laterítica ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ e $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ negativo) e típicas de fosfatos de alumínio tipo crandallita-goyazita e woodhouseita-svanbergita ($\text{P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SO}_3$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SrO}$, CaO-SrO , SrO-Ba positivas), cuja tendência a linearidade, independente dos horizontes, sugere formarem mesma fase e/ou solução sólida constante.....	57
Figura 35 – Diagramas de dispersão para pares de elementos químicos cujas concentrações aumentam em direção às crostas fosfáticas. Os ETR mostram tendência positiva com Ca, Sr, Ba, mas a grande dispersão sugere que estes elementos façam parte de outras fases minerais. Ce-La e Lu-Yb são os únicos ETR que preservam a forte relação entre si independente dos materiais do perfil e cobertura, indicando forte assinatura a uma única fase mineral, provavelmente zircão.....	58
Figura 36 – Diagramas de dispersão de pares de elementos com forte correlação positiva, que se enriquecem no perfil laterítico do depósito de fosfatos do Morro Sapucaia. A pequena dispersão entre Zr-Hf e Nb-Ta, aproximando da linearidade sugere que esses elementos constituem a única fase, o zircão, que deve provir de uma fonte única. Por outro lado os ETR mostram maior dispersão entre si e também com Ba, Y e Th, sugerindo que os mesmos se fracionam entre diferentes fases minerais: fosfatos e zircão.....	59
Figura 37 – Diagramas de dispersão de pares de elementos químicos, que se concentram nas crostas fosfáticas, suportando a forte afinidade entre Ti, Zr, Th e Ga e muito menos profícua com ETR, com os quais tendem a formar dois domínios.....	60
Figura 38 – Dendrograma segundo todas as amostras do perfil laterítico incluindo a cobertura.....	61
Figura 39 – Dendrogramas para os horizontes e cobertura do perfil laterítico do Morro Sapucaia.....	64
Figura 40 – Dendrogramas obtidos com base em análises químicas multi-elementares (A) e nos dados mineralógicos (B). A discriminação dos distintos materiais do perfil laterítico, além da cobertura é categórica apenas em B.....	65
Figura 41 – Concentrações dos ETR no perfil laterítico do Morro Sapucaia normalizadas aos condritos (Evensen et al, 1978). a) Cobertura detrítica; b) Crosta ferroaluminosa fosfática; c) Crosta fosfática; d) Horizonte argiloso; e) Valores médios para cada horizonte; f) Todas as amostras do perfil laterítico.....	67
Figura 42 – Diagrama ternário para as concentrações $(\text{Sr}+\text{Ca}+\text{Na})\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3$ e $\text{SrO-SO}_3\text{-CaO}$ para amostras do perfil de Sapucaia agrupadas segundo horizontes lateríticos definidos. Resultados analíticos de amostras de Jandiá (*) em Costa, 1990...	70
Figura 43 – Razões Ti/Zr para amostras dos principais depósitos lateríticos do Gurupi. (Hallberg, 1984), que denotam a possível similaridade das rochas fontes para os depósitos de Jandiá e Sapucaia. Dados obtidos por Costa, 1990 (Jandiá); Toledo et al, 2006 (Itacupim); Costa, 1980 (Cansa Perna); Costa & Araújo, 1996 (Pirocaua e Trauíra).....	70
Figura 44 – Comparações geoquímicas entre crostas fosfáticas dos depósitos de fosfatos lateríticos da região do Gurupi. Dados geoquímicos obtidos por Costa, 1990 (Jandiá); Toledo et al, 2006 (Itacupim); Costa, 1980 (Cansa Perna e Pirocaua); Oliveira, 1980 (Trauíra).....	71
Figura 45 – Ocorrências de fosfatos primários nas bordas da Bacia do Parnaíba que podem se estender até a região do Morro Sapucaia e Jandiá (porção noroeste da área). Em destaque as formações Longá e Pimenteiras (modificado de Santos, 2004).*Comunicação verbal de Dr. Marcondes Lima da Costa.....	73

TABELAS

Tabela 1 – Localização dos furos de sondagem e trincheiras empregados nesta pesquisa em Sapucaia.....	15
Tabela 2 – Composição mineralógica centesimal agrupada segundo os horizontes lateríticos analisados.....	34
Tabela 3 – Composição mineralógica (% em peso) dos lateritos fosfáticos do Morro Sapucaia segundo Costa & Costa (1987). Os valores da crosta fosfática representam a média aritmética das amostras analisadas.....	34
Tabela 4 – Concentrações (médias) dos elementos químicos maiores, menores e traços de amostras representativas dos horizontes do perfil laterítico fosfático de Sapucaia confrontadas com a composição química da média da crosta superior da Terra. Legenda: M.C.: Média Crustal segundo Wedepohl, 1995; CD: Cobertura Detrítica; CFF: Crosta Ferroaluminosa Fosfática; CF: Crosta Fosfática; SC: Saprólito Caulinítico; FE: Fator de Enriquecimento em relação ao Saprólito. F.E.<1: Lixiviação; 1<F.E.>4: Concentração Relativa; F.E.>4: Concentração Absoluta.....	49
Tabela 5 – Correlações litológicas e mineralógicas básicas entre os depósitos de fosfatos de alumínio laterítico da região do Gurupi e aquele do morro Sapucaia. (Costa, 1980; Toledo et al, 2006).....	69
Tabela 6 – Substituições iônicas no grupo da apatita e no grupo da crandallita (Nathan, 1984; Costa & Costa, 1987).....	71
Tabela 7 – Confrontação entre o conteúdo de elementos traços em fosfatos marinhos, francolita e crandallita de Taiba (Samb, 2000), e fosfatos de Sapucaia (crandallita-goyazita, woodhouseíta-svanbergita e wardita).....	72

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
EPIGRAFE.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	1
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.3.1 Objetivo geral.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
2 ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 FOSFATOS DE ALUMÍNIO LATERÍTICOS.....	3
2.2 OCORRÊNCIAS E DEPÓSITOS DE FOSFATOS LATERÍTICOS DO BRASIL E O CASO GURUPI (NE DO PARÁ E NW DO MARANHÃO).....	3
3 LOCALIZAÇÃO E FISIOGRAFIA.....	7
4 GEOLOGIA REGIONAL.....	10
4.1 FORMAÇÃO ITAPECURU (CRETÁCEO).....	10
4.2 FORMAÇÃO PIRABAS (TERCIÁRIO).....	10
4.3 FORMAÇÃO BARREIRAS (TERCIÁRIO).....	11
4.4 SEDIMENTOS QUATERNÁRIOS.....	11
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
5.2 MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE DETALHE E COLETA DE AMOSTRAS....	14
5.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES.....	17
5.4 IDENTIFICAÇÃO MINERAL POR DRX.....	17
5.5 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TEXTURAL POR MICROSCOPIA ÓPTICA.....	18
5.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	18

5.7 ANÁLISES QUÍMICAS.....	18
5.8 QUANTIFICAÇÃO DAS FASES MINERALÓGICAS.....	19
6 RESULTADOS.....	20
6.1 MODO DE OCORRÊNCIA DOS FOSFATOS DE SAPUCAIA.....	20
6.2 GEOLOGIA DO MORRO SAPUCAIA.....	23
6.2.1 Horizonte Argiloso.....	23
6.2.2 Horizonte Fosfático ou Crosta Fosfática.....	27
6.2.3 Crosta Ferro-Aluminosa Fosfática.....	27
6.2.4 Coberturas.....	31
6.3 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA.....	33
6.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	46
6.4.1 Horizonte Argiloso.....	61
6.4.2 Crosta Fosfática.....	62
6.4.3 Crosta Ferroaluminosa Fosfática.....	62
6.4.4 Cobertura Detrítica.....	62
6.4.5 Os Elementos Terras Raras.....	66
7 DISCUSSÕES.....	68
8 CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS.....	76
ANEXOS.....	88
ANEXO I: Composição mineralógica centesimal das amostras do perfil laterítico.....	89
ANEXO II: Composição química do perfil laterítico de Sapucaia em % peso (elementos maiores) e ppm (elementos-traço).....	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A região costeira dos estados do Pará e Maranhão é marcada pela ocorrência de diversos depósitos lateríticos de fosfatos de alumínio, que representam testemunhos de uma extensa cobertura laterítica desenvolvida sobre rochas pré-cambrianas e fanerozóicas da Plataforma Bragantina ao longo do Eoceno/Oligoceno (Costa, 1978; Costa, 1980; Costa, 1982; Costa, 1984; Costa, 1997). Esta diversificação do substrato, inicialmente enriquecido em minerais fosfáticos instáveis (principalmente apatita, e provavelmente fosfatos de alumínio hidrotermais) às condições de forte intemperismo, propiciou o desenvolvimento de lateritos maduros mineralizados predominantemente em fosfatos secundários, como a solução sólida crandallita-goyazita, e por hidróxidos de alumínio (menos comum), oxi-hidróxidos de ferro, titânio e manganês (Costa & Sá, 1980; Costa, 1982; Costa, 1997; Costa & Santos, 1996). Nesta região, não mais na sua zona costeira, mas a quase 80 km ao sul, foram descobertas ainda nos anos 1980 duas novas ocorrências em Sapucaia e Boa Vista, município de Bonito, Estado do Pará (Costa & Costa, 1987; Costa et al, 1991). Essas ocorrências tornaram-se alvos de pesquisas minerais da empresa Fosfatar Mineração que desenvolveu trabalho detalhado de mapeamento, sondagens, trincheiras e análises químicas, centradas principalmente na avaliação de teores de P_2O_5 e mensuração de reservas, além de testes de tratamento térmico do minério, concluindo que estava diante de uma jazida de pequeno porte, mas de alto valor agregado. Constituiu-se assim a primeira jazida de fosfatos de alumínio secundários no Brasil, com previsão de lavra postergada diversas vezes, mas com expectativa positiva para 2015. Concretizar-se-á assim um antigo sonho de iniciar a produção de termofosfatos em escala comercial a partir dos depósitos fosfáticos das costas litorâneas do Pará e Maranhão, idealizado desde as décadas de 1950/1960.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante da excelente infraestrutura disponível no campo, com mapas, testemunhos de sondagens e trincheiras, e a representatividade geológica do depósito em uma área onde os fosfatos primários são ainda pouco conhecidos, elegeu-se o depósito de fosfatos de Sapucaia para o desenvolvimento da presente dissertação, concentrando-se na caracterização do minério em relação ao corpo laterítico no seu todo, o qual pode se tornar um exemplo clássico de perfil laterítico maduro mineralizado em fósforo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Caracterização geológica, mineralógica e química dos fosfatos de Sapucaia visando identificar sua relação com outras formações lateríticas da região e contribuir para a possível exploração mineral e prospecção de novos depósitos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação foram:

- Definir o perfil geológico laterítico que hospeda a mineralização fosfática;
- Caracterizar a assembleia mineralógica da mineralização e do perfil laterítico no seu todo;
- Determinar a composição química e suas variações e identificar os padrões geoquímicos ao longo do perfil;
- Correlacionar o perfil com as demais ocorrências lateríticas locais e mundiais.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 FOSFATOS DE ALUMÍNIO LATERÍTICOS

Os fosfatos de alumínio constituem um universo amplo de minerais, conhecidos simplesmente como APS (Aluminum Phosphates Sulfates) apresentados numa revisão exaustiva de Dill (2001). São minerais formados em ambientes hidrotermais diversos, em rochas metamórficas de baixo grau, em mantos de intemperismo tropical e sub-tropical e ainda a partir de guanos (Dill, 2001). Entre os APS destaca-se o supergrupo da alunita, onde está inserido o grupo da crandallita, em que a própria crandallita-goyazita é aparentemente o mineral mais abundante do mesmo, especialmente nas formações lateríticas mineralizadas em fósforo. Ocorrências de fosfatos de alumínio são frequentes e tem crescido nos últimos tempos por conta do emprego de técnicas mais refinadas de DRX, acompanhadas de análises químicas totais e microquímicas, em que a ênfase às formações lateríticas meso-paleozóicas tem aumentado, principalmente na China e em parte na Europa. No entanto depósitos econômicos de fosfatos de alumínio lateríticos são raros, sendo os exemplos mais clássicos os de Lam-Lam, no Senegal (Larsen, 1942; Capedcomme, 1953; Slansky et al., 1964; Blanchard, 1972; Bonnot-Courtois & Flicoteaux, 1989) lavrado por décadas. Outras ocorrências de grande referência estão na Nigéria (Russ et al., 1924), Sibéria (Zanin, 1968), Costa do Marfim (Vieillard et al., 1979) e Ontário, Canadá (Erdosh, 1979), Togo (Johnson et al., 2000), em várias ilhas do Pacífico (Bourouilh-Le Jan, 1989), Rússia (Mordberg, 1999), Mont Weld na Austrália (Lottermosser, 1990).

2.2 OCORRÊNCIAS E DEPÓSITOS DE FOSFATOS LATERÍTICOS DO BRASIL E O CASO GURUPI (NE DO PARÁ E NW DO MARANHÃO)

Ocorrências de fosfatos de alumínio intempéricos a lateríticos foram identificados em várias regiões do Brasil, mas principalmente no sul-sudeste. Merecem destaque os fosfatos de alumínio tipo wavellita da mina de fosfatos fosforíticos de Rocinha e Lagamar, em Minas Gerais, formada no manto de intemperismo a partir de fosforitos neoproterozóicos associados ao Grupo Bambuí ou Subgrupo Paraopeba e Grupo Vazante (Dardenne et al., 1986; Damasceno, 1989; Misi et al., 2014). Espessos pacotes intempéricos desenvolvidos sobre complexos ultramáficos-alcalinos-carbonatíticos também desenvolveram fosfatos de alumínio (wavellita, crandallita-goyazita-gorceixita), como produto de alteração destas rochas mineralizadas em apatita. Os principais exemplos encontram-se em Juquiá (SP), Tapira (MG), Catalão (GO) e Anitápolis (SC) (Costa, 1987; Toledo et al., 2002).

Por outro lado, estão na Amazônia os depósitos mais expressivos de fosfatos de alumínio do Brasil e mesmo do mundo, em que a região do Gurupi é notadamente a mais representativa (Costa & Sá, 1987; Costa, 1997). Nesta região, os lateritos desenvolveram um horizonte específico e dominado por estes fosfatos, de tal forma que podem ser considerados minério de alto teor, no entanto com volume pequeno porém lavrável, a exemplo da jazida de Sapucaia, em Bonito (PA).

Esses depósitos eram mais conhecidos nas primeiras descobertas entre 1920 e 1970 como bauxitas fosforosas (Brandt, 1932; Abreu, 1937), uma vez que em vários deles os fosfatos estão associados aos hidróxidos de alumínio, especialmente a gibbsita, principal mineral das bauxitas da Amazônia e do Brasil. Os primeiros depósitos descobertos foram os de Trauíra e Pirocaua no Maranhão (Shaw et al., 1925; Brandt, 1932; Abreu, 1937; Miranda, 1940; Rabello, 1945). Trauíra ainda nos anos 1920 foi palco de pesquisas detalhadas por um grupo de pesquisadores alemães, cujos resultados foram publicados por Brandt (1932), que no entanto não reconheceu o depósito como uma formação laterítica, atribuindo os altos teores de fósforo a origem guânica, cuja teoria foi também assumida por sucessivas pesquisas realizadas em Trauíra e nos outros depósitos, como Pirocaua (Abreu, 1937; Costa et al., 1975). Abreu (1937) se deixou influenciar pelas conclusões de Brandt (1932) e pela leitura sobre os fosfatos guânicos de Oxford County (Maine, USA), da Ilha Chinchas (Peru), da Ilha de Fernando de Noronha (Brasil) e da Ilha Connetable (Guiana Francesa). Miranda (1940) e Rabello (1945) tentaram mostrar a importância econômica desses fosfatos de alumínio como fonte de fósforo, a exemplo da bauxita fosforosa da Serra de Pirocaua, avaliando infraestrutura local e regional. Rabello (1945) embora reconhecesse a relação com formações lateríticas, admite no entanto a mesma origem guânica proposta por Brandt (1932) para o fósforo.

Em função do volume relativamente grande de fosfatos nos depósitos de Trauíra e Pirocaua, os mesmos foram objetos de pesquisa mineral cujos resultados foram divulgados por Sakamoto & Vargas (1956), que estimaram uma reserva de 8.700.000 t de minério para Pirocaua e 8.200.000 t para Trauíra. Nesta oportunidade, caracterizaram o minério cuja composição mineralógica compreendia augelita, variscita, estrengita, wavelita, goethita, limonita e bohemita, e sugeriu fosfatização epigenética do depósito em Pirocaua. Em 1971, a Osaki Mineração desenvolveu o primeiro plano de lavra destes fosfatos. Paralelamente, Argentièrre (1971) divulgava resultados sobre a composição química dos fosfatos de Trauíra, somando-se aqueles de Brandt (1932), e considerando-o como “residual”. Destacou ainda que os processos de dissolução, alteração, bauxitização e lateritização verificados na ilha de Trauíra estavam relacionados com supostas rochas básicas, comparando-os ao que observara no

planalto de Poços de Caldas sobre rochas alcalinas. O mesmo autor admite ainda uma origem distinta para Pirocaua.

O DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral), através do Serviço Geológico do Brasil (Costa et al., 1975 e 1977) também se dedicou ao estudo desses depósitos de fosfatos, com realização de furos de sondagens, porém não acrescentaram novos dados relevantes.

Os primeiros estudos sistemáticos dos depósitos de fosfatos de alumínio lateríticos desta região iniciaram-se em 1976 e seus resultados foram publicados por Costa (1980), Costa & Sá (1980) e Costa et al. (1980), ao estudar os depósitos de Pirocaua e Trauíra, e as novas descobertas de Itacupim, Cansa Perna e Jandiá realizadas por estes autores. Foi a primeira vez que se caracterizou a composição mineralógica e química em detalhe, reconhecendo-se a origem dos altos teores de Sr e Ba e demonstrando-se a origem laterítica destes fosfatos, inclusive sendo comparados a província bauxítica da Amazônia, com idade de formação no Terciário Inferior. Ao mesmo tempo foi demonstrado que estes fosfatos se formaram a partir de diferentes rochas-mãe, estando em Itacupim um exemplo de complexo alcalino-ultramáfico mineralizado em apatita. Paralelamente, Oliveira e Schwab (1980) também discutem os fosfatos de Itacupim. Sucedem-se as novas pesquisas por Siqueira (1982), Reymão (1982), Reymão & Lima (1982), Costa (1991) e Costa & Araújo (1996). Estes últimos reconheceram a partir de estudos geoquímicos multi-elementares das crostas e solos superficiais de Pirocaua, as assinaturas geoquímicas para os fosfatos e para turmalina-ouro. Hoje, a principal mina de ouro do Maranhão opera exatamente no entorno da Serra do Pirocaua e na própria serra, onde ouro e turmalina (dravita) estão associados.

Em 1987, Costa & Costa descrevem o depósito de fosfatos de alumínio de Sapucaia-Boa Vista, no município de Bonito, Pará, cuja descoberta é de autoria destes pesquisadores. A assembleia mineralógica constituída por crandallita-goyazita e wardita, com alto teor de P_2O_5 é uma característica deste depósito. Estudos da assembleia de minerais pesados demonstraram que tanto os fosfatos como as rochas circunvizinhas (Formação Pirabas, Formação Barreiras e sedimentos e solos Pós-Barreiras) tiveram provavelmente a mesma fonte rochosa (Costa & Costa, 1991). Pesquisas com vistas a lavra dos depósitos foram empreendidas recentemente pela empresa Fosfatar Mineração, que delimitou uma jazida de muito alto teor e volume pequeno, porém econômico. O depósito promete se tornar a primeira mina de fosfatos de Al em operação no Brasil.

Além da região do Gurupi, mantos superficiais com fosfatos de alumínio lateríticos derivados a partir de rochas de complexos alcalino-ultramáfico-carbonáticos foram descobertos e pesquisados em outras regiões da Amazônia, em que Maicuru, no Pará é o mais proeminente

e mineralizado em apatita e titânio (Lemos & Costa, 1987; Lemos, 1990; Angélica, 1991; Angélica & Costa, 1990, 1991, 1993; Lemos et al., 1993; Martins & Costa, 1997). Outro exemplo, embora pouco conhecido comparativamente, é o depósito de Seis Lagos no Amazonas onde crostas lateríticas muito espessas contém fosfatos de alumínio, pseudobroquita, niobiorutilo e minerais de terras raras como monazita (Issler, 1980; Justo & Souza, 1984; Correa et al., 1988; Correa & Costa, 1997). O substrato primário é interpretado como carbonatito (Issler, 1978). Espessos pacotes de sedimentos lacustres recobrem localmente estas crostas e preservam sua assinatura geoquímica e em parte, a mineralógica (Costa & Correa, 1997).

3 LOCALIZAÇÃO E FISIOGRAFIA

A área de estudo, conhecida como morro Sapucaia ($47^{\circ}24'30''$ / $01^{\circ}23'30''$), está localizada em via rural homônima da região sudoeste do Município de Bonito ($01^{\circ}21'48''$ / $47^{\circ}18'21''$), região nordeste do Estado do Pará (Figura 1). O acesso rodoviário pode ser realizado a partir de Belém através da BR-316, por aproximadamente 130 km, alcançando a interseção com a travessa rural não pavimentada Sapucaia, onde o percurso é feito por 12 km para sul até a entrada da fazenda Fosfatar. Aproximadamente 2,2 km ao sul do morro Sapucaia, encontra-se o depósito Boa Vista, localizado na travessa rural homônima paralela à travessa Sapucaia.

O depósito de fosfatos de alumínio Sapucaia ocupa uma elevação sutil, que localmente corresponde a um morro com 714 m de extensão e largura máxima de 321 m. A altitude máxima é de 58 m enquanto os terrenos bordejantes mais baixos estão a 32 m de altitude (Figura 2). O topo quase plano é sustentado por crosta ferro-aluminosa fosfática ou simplesmente alumino-fosfática. O declive das encostas leste e sul é suave por conta da cobertura coluvionar areno-argilosa recente, e ao norte e oeste, as encostas abruptas verticais expõem as crostas lateríticas. Num raio de 50 km a região é plana, com elevações sutis que podem alcançar de 60 a 72 m, no entanto estas não apresentam necessariamente crostas lateríticas ricas em fosfatos, mas latossolos sobrepostos a crostas lateríticas ferroaluminosas imaturas. Portanto Sapucaia, ao contrário dos demais depósitos de fosfatos de alumínio da região litorânea, não configura plenamente um platô laterítico (Costa, 1980; Reymão, 1982; Siqueira, 1982; Costa, 1990; Araújo & Costa, 1996; Souza et al, 2001).

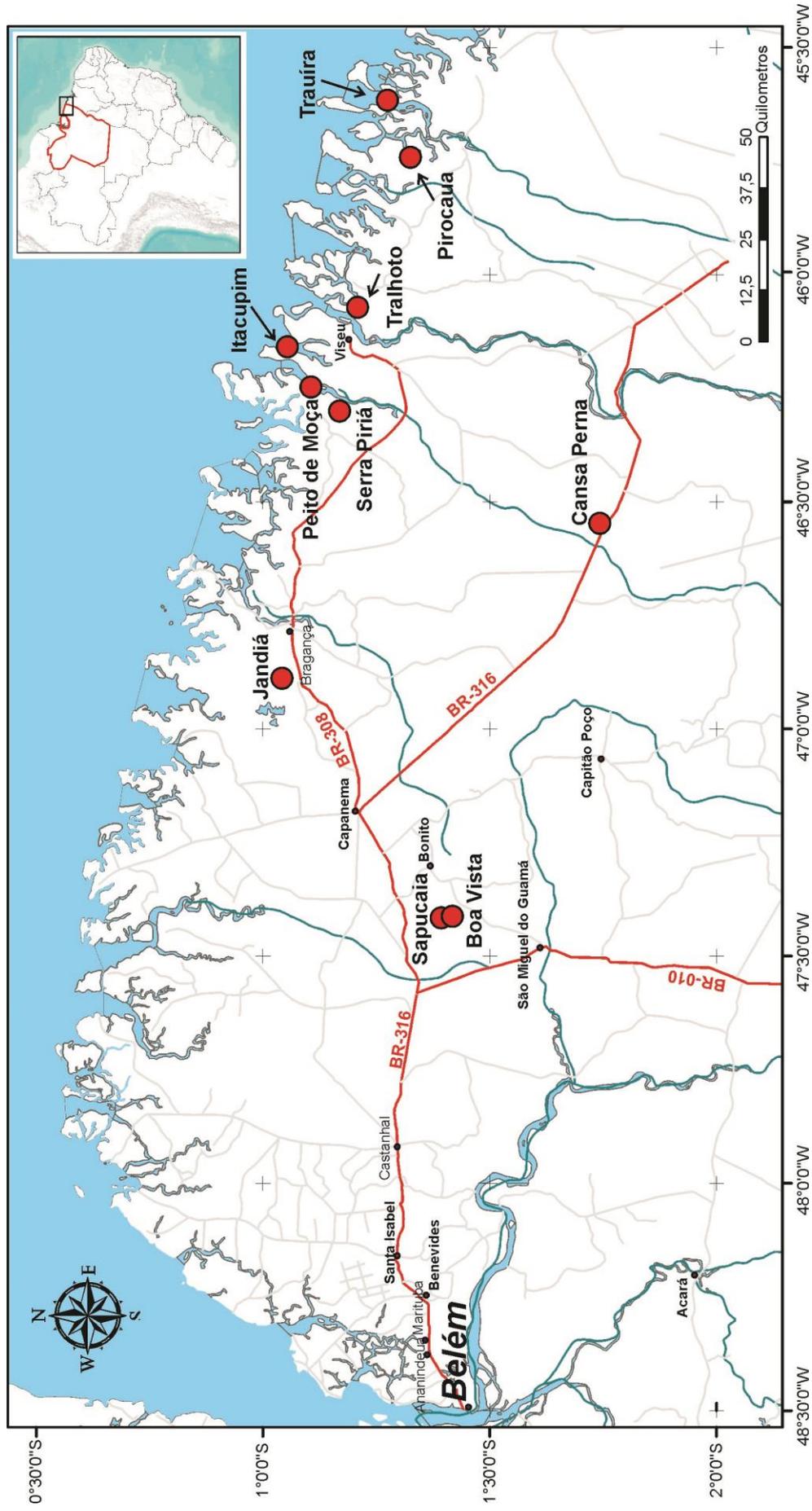


Figura 1 – Mapa geográfico da região Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão, mostrando a localização das ocorrências e depósitos de fosfatos de alumínio, com ênfase na jazida de Sapucaia e Boa Vista, Bonito, Pará. Modificado de Costa & Sá, 1980; Costa, 1980; Costa, 1990.

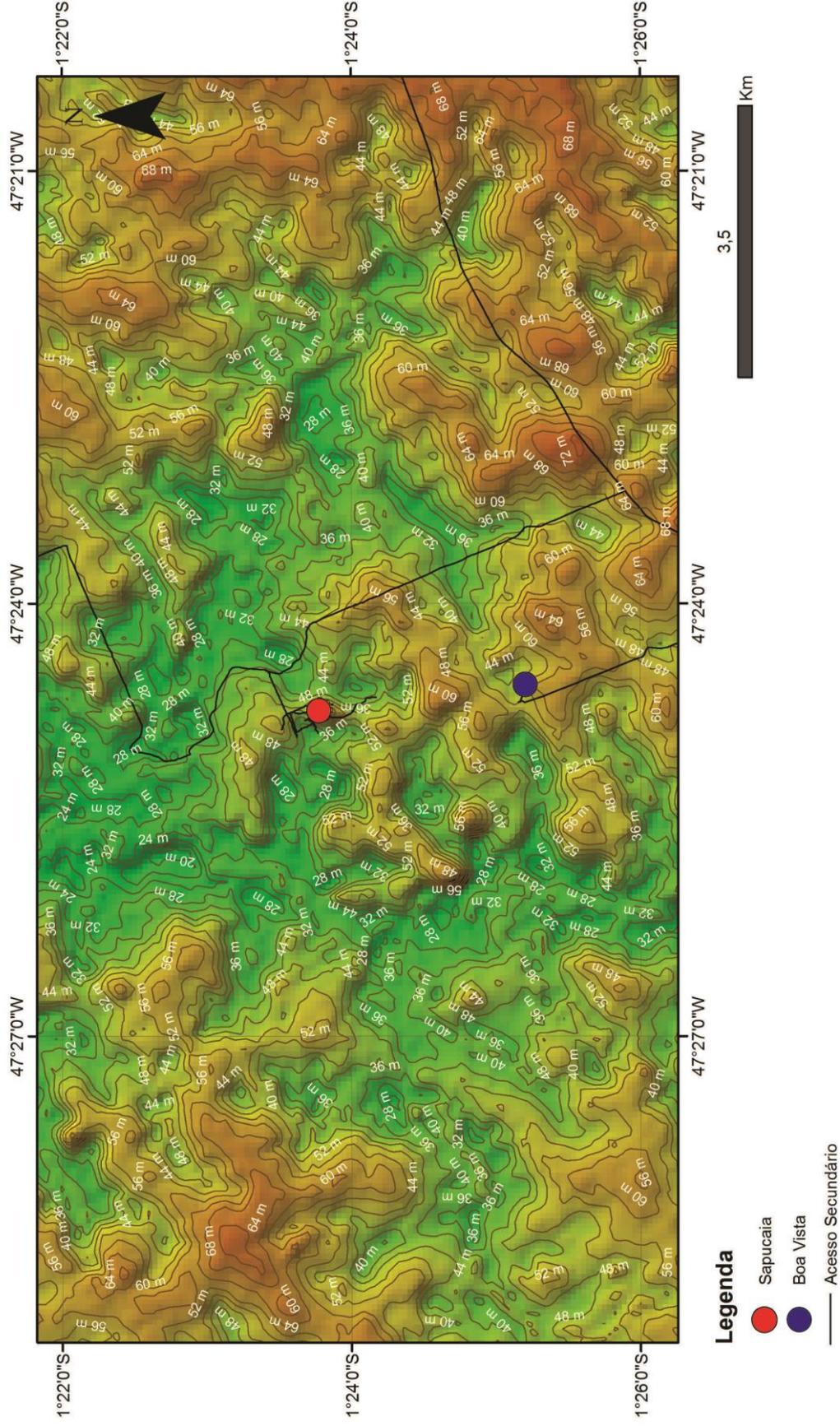


Figura 2 – Mapa topográfico ilustrando a posição coincidente no intervalo de cotas dos depósitos de fosfatos de alumínio lateríticos de Sapucaia (amarelo) e Boa Vista (verde) em relação ao nível do mar (0,0m).

4 GEOLOGIA REGIONAL

Segundo Costa (2000) e Vasquez & Rosa-Costa (2008) a geologia da região nordeste do Pará representada pela folha AS.23-V-C (Castanhal) compreende três grandes ambientes geotectônicos: a) Cráton São Luís, representado pela Suíte Intrusiva Tracuateua (granitos Tracuateua, Mirasselas e Tauari); b) Faixa de Cisalhamento Gurupi, constituída pela Suíte Alcalina Boca Nova, Grupo Gurupi (formações Vila Cristal, Jaritequara e Rio Piritoró) e por granitoides brasileiros (Ney Peixoto, Ourem, Jonasa, Japiim e Cantão); e c) Coberturas sedimentares atribuídas ao Proterozoico, Paleozoico, Mesozoico e Cenozoico. O morro Sapucaia encontra-se no domínio das coberturas do Mesozoico-Cenozóico (Figuras 3 e 4), que compreende:

4.1 FORMAÇÃO ITAPECURU (CRETÁCEO)

Representada por: (i) Facies conglomerados com estratificação cruzada acanalada, matriz suportada, exibindo seixos de quartzo com até 10 cm; (ii) Facies microconglomerado com estratificação cruzada acanalada, clastos suportados, com seixos de quartzo, chert e quartzitos mal selecionados, arredondados a subangulosos; (iii) Facies siltito arenoso maciço, de coloração vermelho-amarelada, contendo areia e seixos de quartzo mal selecionados espaçadamente; (iv) Facies arenito com estratificação cruzada acanalada, com arenitos amarelados fino a médio, mal selecionados, de composição arcossiana e caulínica.

4.2 FORMAÇÃO PIRABAS (TERCIÁRIO)

Possui ocorrência predominantemente sub-aflorante na área, com exposições discretas nas porções mais erodidas do terreno. Os melhores afloramentos dos calcários Pirabas encontram-se a norte da cidade de Capanema, em uma lavra ativa da CIBRASA/Cimento NASSAU (mina B17) com uma camada de até 12 m de espessura em diversos cortes. As camadas de calcário são relacionadas à transgressão oligo-miocênica, altamente fossilíferas, com alternâncias de folhelhos esverdeados a negros, piritosos. Costa (2000) em seu trabalho de revisão bibliográfica e atividades de campo, agrupou três facies nessa unidade: a) Biocalcirudito, formado por calcários maciços de conteúdo faunístico diversificado; b) Folhelho Negro Piritoso (< 3m), fossilífero com cristais de gipsita e intercalações de areia fina e; c) Calcirudito (< 7m), que pode mostrar algum conteúdo fossilífero. O contato superior com a Formação Barreiras é tipicamente transicional.

4.3 FORMAÇÃO BARREIRAS (TERCIÁRIO)

É a unidade com maior ocorrência em superfície da Folha Castanhal. Encontra-se em contato discordante com as supracrustais do Grupo Gurupi e gradacional com a Formação Pirabas. Compreende dois sistemas deposicionais (Costa, 2000): um continental, com leques aluviais e depósitos fluviais de rios meandrantas, e outro, de natureza marinha, dominado por maré. As litologias incluem: a) Fácies pelíticas, constituídas principalmente por argilitos maciços de coloração diversa, localmente com intercalações com argilas; b) Fácies arenosa, com arenitos normalmente avermelhados ou ferruginosos, mal selecionados e; c) Fácies conglomerática, com conglomerados avermelhados matriz suportada, exibindo seixos subangulosos a subarredondados.

4.4 SEDIMENTOS QUATERNÁRIOS

Compreendem os extensos depósitos de areia branca quartzosa, comparáveis a spodozols. Os sedimentos recentes foram associados ao produto da sedimentação produzida atualmente pela rede de drenagens instalada na área da Folha Castanhal, independente da unidade fonte do material sedimentar. Normalmente são caracterizados por depósitos de calha e de planície de inundação

QUATERNÁRIO	HOLOCENO	Sedimentos Recentes	Qha	Sedimentos inconsolidados constituídos por areais quartzosas de granulação fina, cascalho fluvial, argilas e siltes.
	PLEISTOCENO	Sedimentos Pós-Barreiras	Qpp	Sedimentos inconsolidados areno-argilosos e argilo-arenosos, amarelos a avermelhados, com gânlulos de quartzo e blocos de arenito ferruginoso.
TERCIÁRIO	INFERIOR	Grupo Barreiras	Tlb	Sedimentos siliciclásticos constituídos por argilito, siltito, arenito e níveis de pelito associado.
		Formação Pirabas	Tlp	Calcário fossilífero, as vezes com folhelho e marga associados.
CRETÁCEO		Formação Itapecuru	Ki	Arenito grosseiro a conglomerático, arenito médio-grosseiro e níveis de pelito associado.
EO-PALEOZÓICO		Arenito Guamá	Epg	Arenito de cor branca, fossilífero, granulação fina a média.
		Formação Piriá	Epp	Grauvacas, arenito arcossiano com leitos conglomeráticos e pelito associado a marga.
PROTEROZÓICO	NEOPROTEROZÓICO	SUÍTE INTRUSIVA BRASILIANA	Psc	Granito Cantão: biotita monzogranito intrusivo, leucocrático, cinza e esbranquiçado. Granulação variando de média a grossa.
			Psjp	Granito Japim: biotita granodiorito porfirítico, biotita-muscovita sieno a monzogranito, muscovita leucosienogranito, aplitos e pegmatitos na forma de
			Psj	Granito Jonasa: biotita-muscovita sienogranito associado a diques sinplutônicos pegmatitos e aplitos portadores de berilo, granada, turmalina e sulfetos.
			Pso	Granito Ourém: biotita-muscovita sienogranito associado a diques sinplutônicos, pegmatitos e aplitos.
			Psy	Granito Ney Peixoto: rochas sienograníticas a duas micas, cor cinza, granulometria média a grossa.
	INDIFERENCIADO RETRABALHADO NO BRASILIANO	SUÍTE ALCALINA BOCA NOVA GRUPO GURUPI	Pbn	Nefelina Sienito Gnaiss: biotita gnaissóide, cor cinza a levemente caramelado, granulação média grossa
			Pgp	Formação Rio Piritoró: sequência metassedimentar composta de sericita filito, filito carbonoso, sericita quartzito, metagrauvacas e metasiltitos, em muito baixo grau metamórfico.
			Pgjr	Formação Janitaquara: sequência metassedimentar de baixo grau metamórfico, composta por biotita-muscovita xistos, granada-cloritóide-muscovita-biotita xistos, xisto granatífero.
			Pgvc	Formação Vila Cristal: Sequência metassedimentar de médio grau metamórfico, composta de granitóides, epidoto-biotita xistos microclinizado, xisto estaurolítico e biotita quartzito.
	Paleo Proterozóico	Paleo Proterozóico	Pltc	Granito Tauari / Granito Mirasselas / Granito Tracuateua: Biotita - muscovita sienogranitos associados a diques, pegmatitos e aplitos. Cor cinza, ramente rosado, granulação média grossa.

Figura 3 – Coluna estratigráfica proposta por Vasquez & Rosa-Costa (2008) para a região nordeste do estado do Pará.

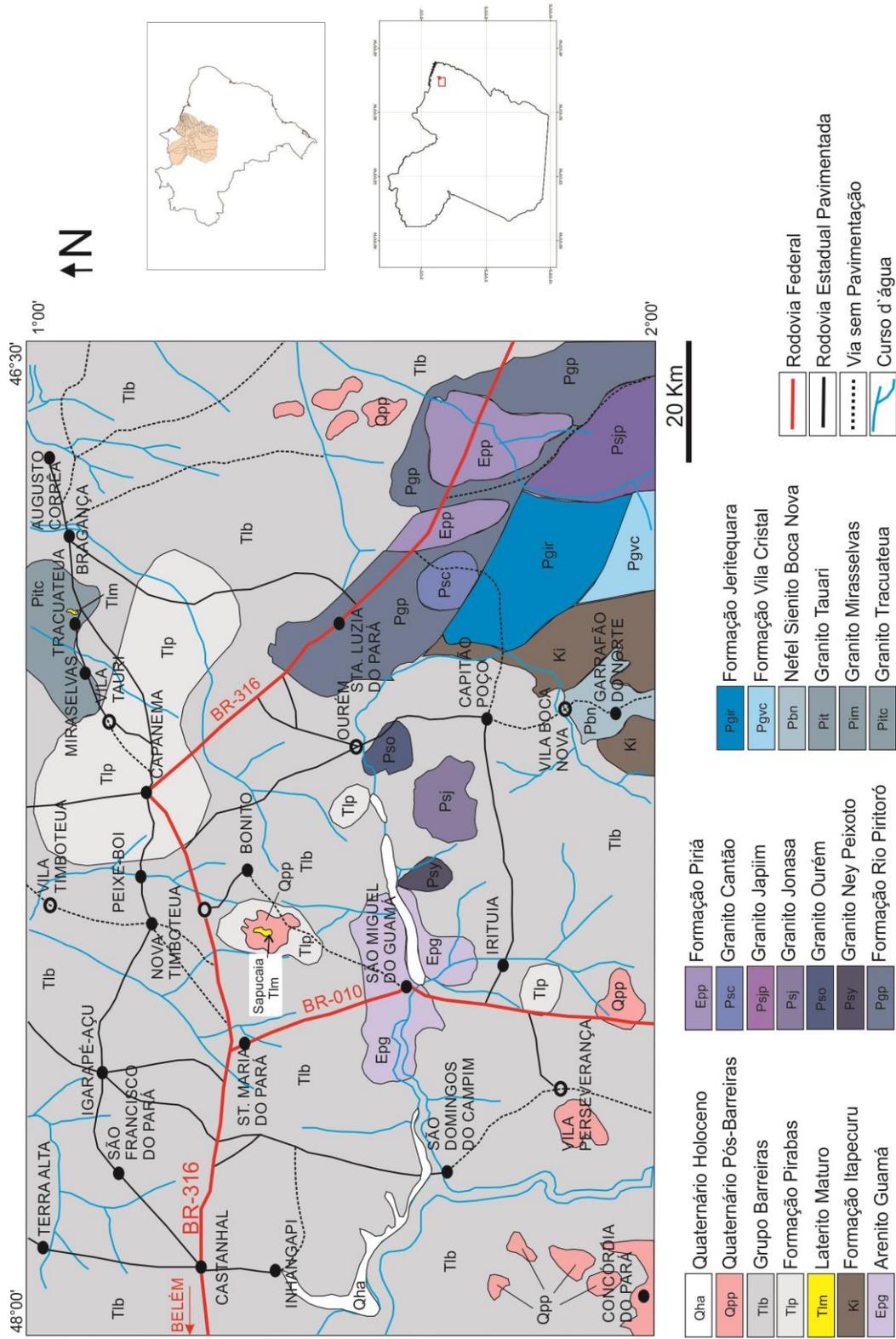


Figura 4 – Mapa geológico regional modificado da Folha Castanhal (SA.23-V-C) de Costa (2000). Notar indicação da unidade Laterito Maduro (Tlm) em suas respectivas áreas de ocorrência. A Formação Pirabas (Tlp) indicada no mapa é aflorante a subaflorante.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do presente trabalho envolveu atividades de campo, de escritório e laboratoriais, descritas a seguir.

5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para avaliar a extensão e a importância dos fosfatos lateríticos foi executado um levantamento e leitura dos trabalhos já realizados, publicados em diversas fontes de divulgação científica nacional e internacional.

5.2 MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE DETALHE E COLETA DE AMOSTRAS

O mapeamento geológico de detalhe (1:10.000) foi uma consequência lógica dos trabalhos de pesquisa mineral realizada pelo autor como geólogo sênior da empresa detentora dos direitos minerários, a Fosfatar Mineração e posteriormente, Rio Verde Minerals. Para tal se utilizou os afloramentos naturais, estradas, trincheiras, poços e furos de sondagem.

A Fosfatar Mineração gentilmente permitiu a coleta de amostra nos testemunhos obtidos através de sondagem diamantada (Tabela 1). Esses furos correspondem a 8 (oito) seções que representam as variações principais do depósito e do perfil laterítico com um todo. Além disto, foram feitas descrições e coleta de amostras em 2 (duas) trincheiras (150 m de extensão, 1m de largura e até 2 m de profundidade) abertas sobre as encostas N e NE do depósito de Sapucaia (Figura 5). Estas foram fundamentais para definir as relações de contato entre as crostas ferruginosa-aluminosa-fosfática, fosfática e/ou horizonte de fosfatos, horizonte argiloso subjacente, e as coberturas.

Após as descrições, coletou-se 44 amostras concentradas principalmente no domínio de fosfatos (crostas), o minério, em que o intervalo de amostragem foi da ordem de 1 m.

Tabela 1 – Localização dos furos de sondagem e trincheiras empregados nesta pesquisa em Sapucaia.

Furo de Sondagem	Coordenada E	Coordenada N	Zona	Uso
SPD-007D	231426	9845530	23M	Amostragem
SPD-011	231577	9845627	23M	Amostragem
SPD-017	231672	9845524	23M	Amostragem
SPD-024	231384	9845325	23M	Amostragem
SPD-028	231577	9845326	23M	Amostragem
SPD-030	231677	9845328	23M	Amostragem
SPD-040	231424	9845728	23M	Amostragem
SPD-041	231527	9845726	23M	Amostragem
SPD-002	231475	9845826	23M	Descrição
SPD-004D	231577	9845429	23M	Descrição
SPD-005D	231479	9845428	23M	Descrição
SPD-006D	231395	9845430	23M	Descrição
SPD-006	231474	9845722	23M	Descrição
SPD-010	231477	9845626	23M	Descrição
SPD-022	231724	9845425	23M	Descrição
Trincheira	Coordenada E	Coordenada N	Zona	Uso
SPT-001	231499	9845895	23M	Descrição
	231495	9845769	23M	
SPT-002	231730	9846739	23M	Descrição
	231591	9846631	23M	

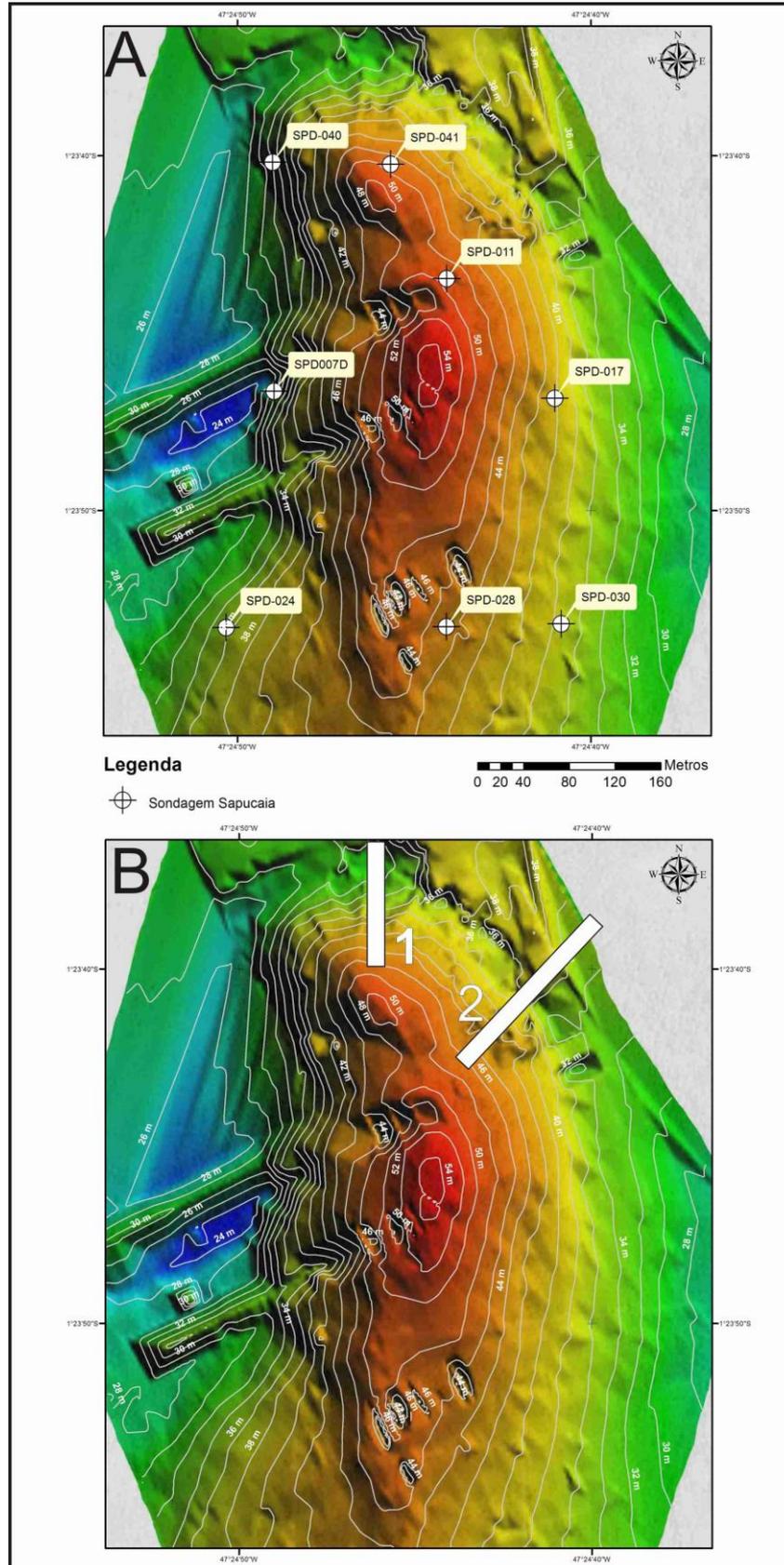


Figura 5 – Mapa topográfico de Sapucaia com a localização dos furos de sondagem (A) e trincheiras 1 e 2 (B) utilizados para as descrições litológicas.

5.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISES

As amostras coletadas foram submetidas a diversas rotas de preparação segundo a metodologia de cada análise (Costa, 1980; Costa & Sá, 1980; Costa, 1990; Angélica, 1996; Correa & Costa, 1997; Kotschoubey et al., 2005; entre outros), descritas a seguir.

Em função da complexidade textural, estrutural e químico-mineralógica dos materiais constituintes da geologia do morro Sapucaia, envolvendo materiais amorfos a criptocristalinos, tipo plasma, com minerais intercrescidos em escala micro ou mesmo nanométricos, foi necessária a combinação de diversos métodos analíticos para se alcançar uma melhor caracterização destes materiais (Figura 6).

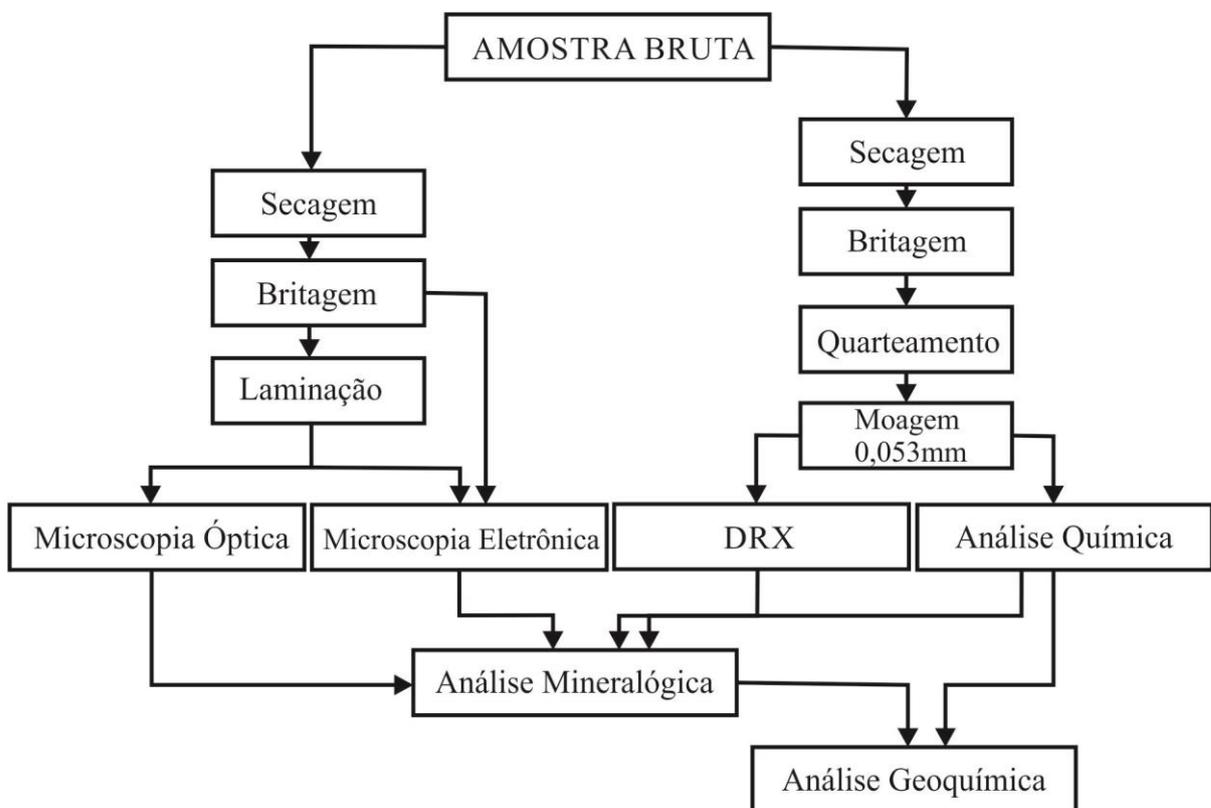


Figura 6 – Fluxograma da rota de preparação de amostras e das análises realizadas.

5.4 IDENTIFICAÇÃO MINERAL POR DRX

Todas as amostras foram analisadas por difração de raios X (DRX) para tentar identificar as suas principais fases e auxiliar as análises por microscopia. Elas foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineralógica (LCM) do Instituto de Geociências da UFPA. O equipamento utilizado foi o X'PERT PRO MPD, com goniômetro PW 3040/60 (theta-theta) da PANalytical, com anodo de cobre ($\lambda_{CuK\alpha 1} = 1,5406 \text{ \AA}$), filtro $K\beta$, gerador de tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. O intervalo de varredura foi de 5° a $75^\circ 2\theta$, com passo de $0,02^\circ 2\theta$ e

duração do passo de 5 segundos, aproximadamente. Os arquivos digitais gerados foram interpretados através do software X'PERT HIGHSCORE, por comparação com fichas PDF (Powder Diffraction Files) fornecidas pelo ICDD (International Center for Diffraction Data).

5.5 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TEXTURAL POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Para este fim foram confeccionadas 14 lâminas delgadas de amostras das crostas e as análises foram realizadas no laboratório do Grupo de Sedimentologia da UFPA, com o uso de um microscópio Zeiss Axiolab 450910, dotado de lentes de aumento de 10, 20 e 50 vezes, acoplado a uma câmera digital e a um microcomputador.

5.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Estas análises foram também utilizadas para a identificação de espécies minerais em escala micrométrica através de sua morfologia e composição química semiquantitativa. Empregou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura Hitachi, modelo TM 3000 e Detector SwiftED 3000 e software SwiftED 3000, pertencentes ao laboratório LaMiGA, no Museu de Geociências da UFPA. Foram analisadas 16 amostras representativas das crostas fosfáticas utilizando fragmentos centimétricos metalizados com ouro ou em estado natural, bem como lâminas polidas sem lamínulas. Complementarmente, algumas análises por EDS foram realizadas no LABMEV-UFPA, empregando-se o equipamento LEO ZEISS modelo 1430, com EDS Sirius-Gresham acoplado.

5.7 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas de amostra total (elementos maiores, menores e traços, incluindo os elementos terras raras) foram realizadas na Acme Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd. A determinação dos elementos maiores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO) foi feita por ICP-OES após fusão de cada amostra com borato de lítio (LiBO_2), enquanto os elementos traços (Mn, Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr e Y), incluindo os terras-raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu) através de ICP-MS após a fusão com borato de lítio. Os demais elementos traços (Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl e Zn) após a abertura com água-régia ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$) a 95°C , foram também determinados por ICP-MS. A P.F. foi obtida por calcinação a 1.000°C e gravimetria, enquanto o carbono total (TOT/C) e enxofre total (TOT/S) foram analisados por LECO.

5.8 QUANTIFICAÇÃO DAS FASES MINERALÓGICAS

A quantificação das fases mineralógicas foi realizada através de cálculo estequiométrico com base nas análises químicas de amostra total, seguindo os procedimentos disponíveis na literatura (Costa, 1980; Reymão; 1982; Angélica, 1991; Angélica, 1996; Dill 1996; Araújo & Costa, 1997; Toledo, 1999; Kotschoubey, 2005; entre outros), onde o fluxograma da figura 7 ilustra todos os passos empregados. Todo o teor de SO_3 foi considerado como ligado à estrutura da série woodhouseíta-svanbergita, em que os teores de CaO e SrO excedentes, foram empregados para calcular as concentrações de crandallita-goyazita; os valores excedentes de $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$, além de Na_2O representaram a série wardita-millisita; os valores remanescentes de $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ balanceados com os ETR + Ba permitiram calcular os teores de florencita-gorceixita; todo o conteúdo de K_2O e SiO_2 equivalente, e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ excedente foram utilizados para determinar a concentração de muscovita; os valores então remanescentes de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$ foram atribuídos a caulinita; os teores de SiO_2 remanescente foram calculados para quartzo; os valores remanescentes de H_2O e todo o teor de Fe_2O_3 foi destinado a goethita e/ou hematita; e finalmente todo o teor de TiO_2 foi convertido em anatásio, visto que ilmenita é rara ($\leq 1\%$ na fração pesada).

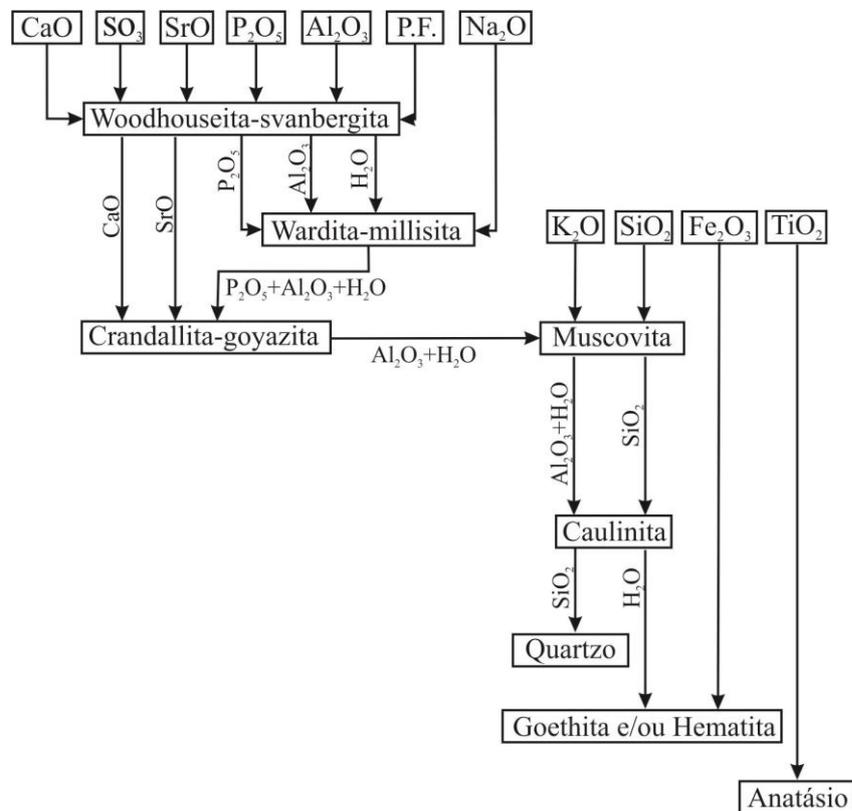


Figura 7 – Fluxograma ilustrando o cálculo estequiométrico das principais fases minerais nas amostras analisadas.

6 RESULTADOS

6.1 MODO DE OCORRÊNCIA DOS FOSFATOS DE SAPUCAIA

A geologia do entorno do depósito de fosfatos de Sapucaia (Figura 8) teria como unidade mais antiga os fosfatos lateríticos representados pelas crostas, parcialmente cobertas pelos calcários fossilíferos da Formação Pirabas, geralmente sub-aflorantes. Estes por sua vez, foram recobertos em contato tipicamente gradacional pelos arenitos e argilitos da Formação Barreiras, que foram afetados pela lateritização imatura de ampla distribuição na Amazônia, e finalmente ao seu topo transformados parcialmente em latossolos amarelos. Estes latossolos também se desenvolveram parcialmente sobre as rochas dos perfis lateríticos maduros, principalmente sobre as crostas que estão ao topo e são muitas vezes confundidos como uma unidade estratigráfica amplamente difundida na região, conhecida como Pós-Barreiras.

Admitem-se rochas graníticas e granito-gnáissicas proterozóicas, e quartzo-arenitos paleozóicos da Formação Guamá que afloram próximo aos limites da área investigada como o substrato das formações Pirabas e Barreiras, e da unidade que deu origem aos fosfatos de alumínio, ou seja, ao perfil laterítico maduro. A única informação sobre o possível substrato do perfil laterítico fosfático a ser descrito em seguida foi obtida por furos de sondagens, infelizmente rasos (30 m). Ele se apresenta como material argiloso, marrom avermelhado, por vezes caulínico, rico em muscovita; localmente lentes ou bolsões de areia fina, branca, quartzosa, com selecionamento, arredondamento e esfericidade moderados e envoltos por películas argilosas que gradam para baixo para uma camada de ± 2 metros de espessura de areia cinza escura, também quartzosa, granodecrescente ascendente, de seixo a areia muito fina. Este material na região vizinha encontraria correlação parcial com os caulins de Aurora do Pará, a base de perfil laterítico maduro, portanto equivalente ao saprólito, derivado da Formação Ipixuna/Itapecuru, cretácea (Costa et al., 1997). No entanto estas formações são desprovidas de fosfatos e portanto, o substrato do perfil laterítico de Sapucaia e Boa vista, permanece ainda desconhecido. Os lateritos fosfáticos do Morro Sapucaia, representados principalmente por suas crostas, dada a correlação com a ampla distribuição de bauxitas, são considerados também de idade Eoceno-Oligoceno (Costa & Costa, 1987; Costa, 1991). As crostas estão comumente expostas em barrancos naturais, trincheiras, poços escavados e furos de sondagens.

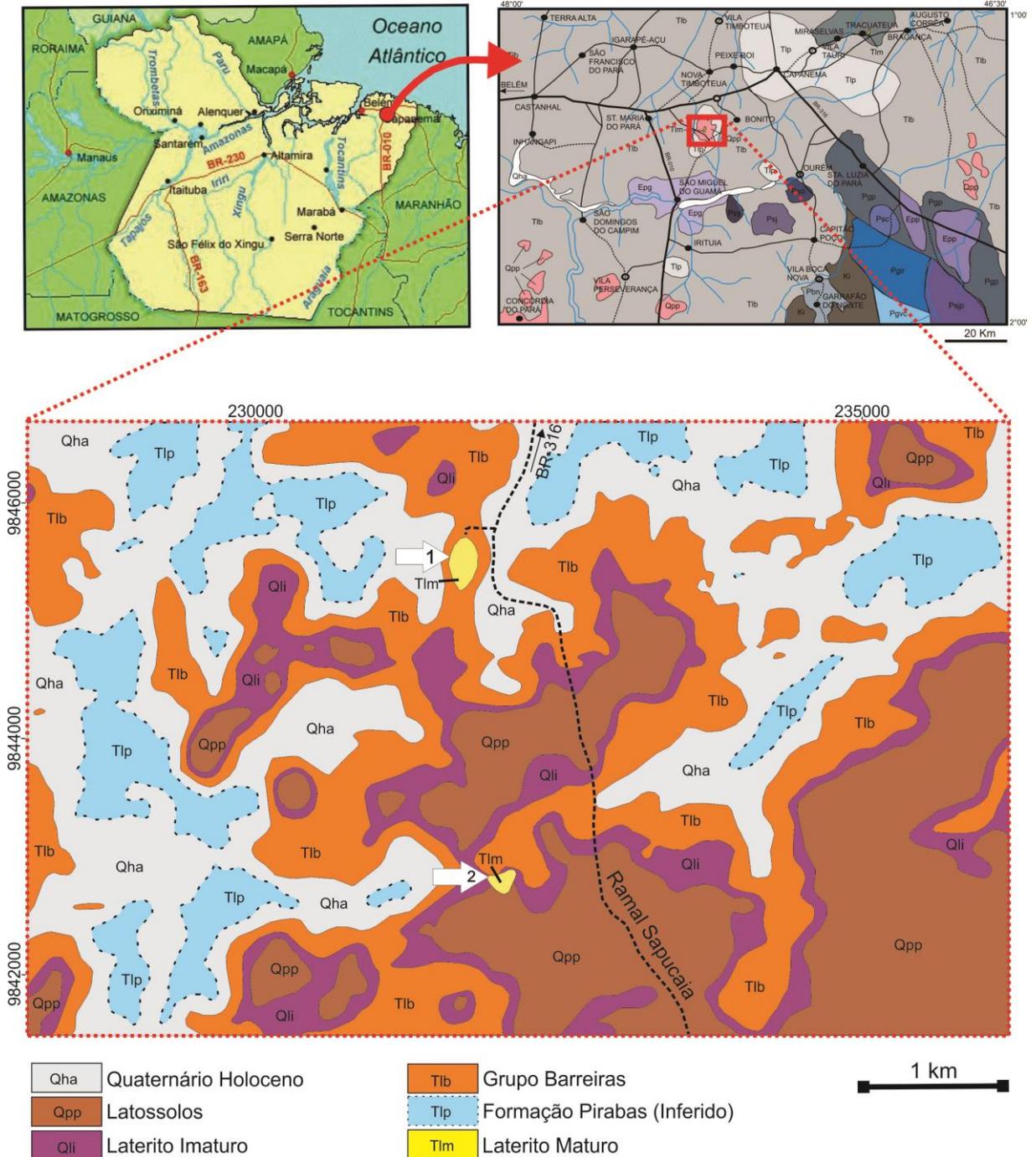


Figura 8 – Mapa geológico para a região do entorno dos depósitos de fosfatos de alumínio de Sapucaia e Boa Vista, modificado a partir da Folha Castanhal (SA.23-V-C) de Costa, 2000 e de atividades de campo do autor deste trabalho. Seta 1 indica o depósito de fosfatos de Sapucaia, correspondente a formação laterítica madura completa e a seta 2 o depósito de fosfatos de Boa Vista, correlacionável a Sapucaia. Tlp: Formação Pirabas sub-aflorante, atingida por alguns furos de sondagens na borda dos morros.

A Formação Pirabas (Mioceno Inferior) aflora nas proximidades do município de Capanema, mas foi exposta principalmente pelas cavas de lavra do seu calcário para o fabrico de cimento. No entorno de Sapucaia e Boa Vista ela foi encontrada somente em subsuperfície através de testemunhos de sondagem rasa, em cota aproximada de 26 m. Ela se encontra depositada sobre o material saprolítico (Figura 9) ou sobre as crostas lateríticas de Sapucaia e Boa Vista, e em contato gradativo com as rochas da Formação Barreiras no topo. A Formação Pirabas está representada por argilitos carbonáticos de coloração cinza, por vezes fossilífero, em que os indivíduos mais expressivos pertencem à ordem Ostreoída (Figura 9). Intercalações de camadas arenosas pouco carbonáticas e ferruginosas foram encontradas, e em determinados locais o calcário quando maciço mas parcialmente intemperizado, se assemelha às crostas lateríticas fosfáticas cuja sua distinção pode ser definida a partir da composição química da rocha. A ampla distribuição da Formação Pirabas foi inferida a partir de indícios sutis de superfície e dos dados rasos das sondagens e poços, correlacionando-se sua distribuição a cota aproximada de 26m.

A sedimentação Pirabas deixa o domínio continental e converge a flúvio-lacustre no Meso-Mioceno e talvez em parte do Plioceno, sob a denominação de Formação Barreiras. Esta se estende por toda a área e está representada por arenitos argilosos, com intercalações rítmicas de arenitos e siltitos, por vezes maciços ou com estratificações cruzadas tabulares e acanaladas incipientes. Superfícies de reativação com lâminas de argilito cinza que recobrem os limites de *sets* e grupos de *foresets* são comuns no entorno do Morro Sapucaia. O contato de base com sedimentos da Formação Pirabas é marcado por intercalações de argilitos ricos em fósseis vegetais (folhas, frutos e troncos).

Os lateritos imaturos se sucederam e afetaram principalmente as rochas da Formação Barreiras, além dos lateritos maduros e sua cobertura detrítica. Em superfície eles são de ampla distribuição e se destacam pela exposição de suas crostas ferroaluminosas, colunares e/ou cavernosas, com espessura de 1 a 3 m recobrando o horizonte mosqueado, sendo comum a presença de camadas delgadas e descontínuas de arenito ferruginizado. Estes materiais são de amplo uso em pavimentação das vias de acesso rurais e construção de base de habitações. Podem também estar obliterados pelo intemperismo posterior, erosão fluvial e/ou por coberturas sedimentares pleistocênicas e holocênicas e latossolos amarelos que são encontrados em cotas normalmente acima de 50 m, e em geral são confundidos com a unidade Pós-Barreiras. Nos vales de fundo sub-aplainados, ocorrem sedimentos aluviais areno-argilosos e seixos.

6.2 GEOLOGIA DO MORRO SAPUCAIA

Aproximadamente 27% da superfície do morro estão representados por crosta laterítica ferro-aluminosa-fosfática, 30% por crosta fosfática intacta ou parcialmente degradada, e os demais por depósitos coluvionares (cobertura detrítica fosfática) e latossolos amarelos (Figura 10).

O Morro Sapucaia (Figura 11) no seu todo foi esculpido sobre uma formação laterítica matura, que segundo as observações de campo, trincheiras e furos de sondagem, é constituído dos seguintes horizontes, como mostram as duas seções apresentadas (Figura 12): *horizonte argiloso saprolítico* na base (parcialmente atingido pela sondagem), o *horizonte fosfático (crosta fosfática)*, se apresentando como crosta compacta a parcialmente obliterada ou ainda como nódulos, e sobre esta em contato gradual, a *crosta ferro-aluminosa-fosfática*, brechóide tipo pele-de-onça, aflorante mas em geral bastante intemperizada e erodida. Esta sucessão de horizontes se equivale àquela dos depósitos de bauxitas e caulim, e principalmente aos demais depósitos de fosfatos de alumínio (Costa, 1997) da região Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão.

6.2.1 Horizonte Argiloso

Foi observado apenas em furos de sondagem, não aflorando nas encostas do morro e nem nos terrenos vizinhos. Está representado por material argiloso amarelo a marrom, localmente caulínico, rico em caulinita, quartzo, plaquetas milimétricas de muscovita, e nas faixas marrons a vermelhas contém ainda hematita e/ou goethita (Figura 9), com espessura que ultrapassa 20 m. Como já apresentado anteriormente, correlaciona-se com saprolitos derivados das formações Ipixuna e Itapecuru, que deram origem as bauxitas e caulins da região, a principal produtora destes bens minerais no Brasil (Kotschoubey et al., 2005). Na zona de contato com o horizonte fosfático acima, o atual horizonte além de cor clara e aspecto terroso, enriquece-se em fosfatos de alumínio, formando nódulos cujos diâmetros aumentam em direção aquele horizonte.

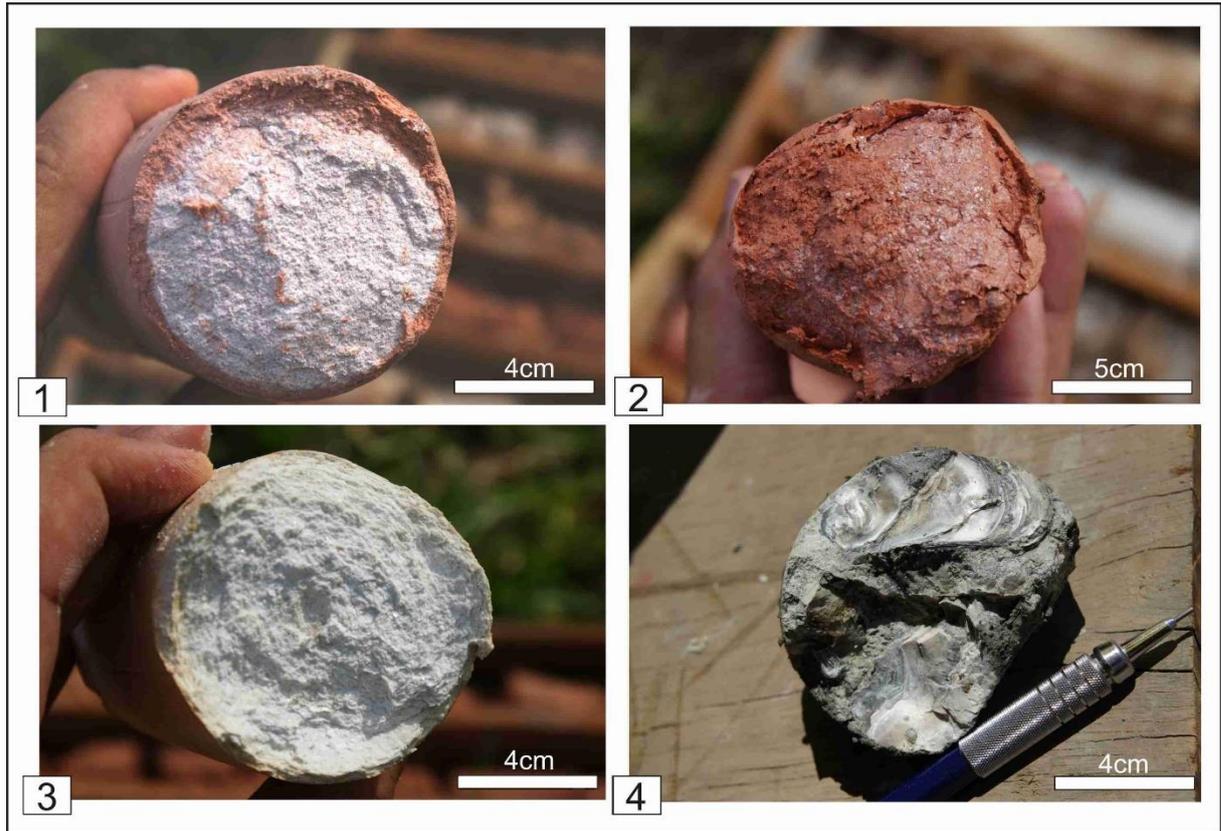


Figura 9 – Amostras retiradas de testemunhos de sondagem da jazida de Sapucaia: 1) Horizonte saprolítico dominado por material arenoso quartzoso; 2) Material argiloso marrom a violáceo e ferruginoso com plaquetas frequentes de muscovita; 3) Zona caulínica formada principalmente por caulinita, além de quartzo e muscovita, normalmente logo acima da zona argilosa violácea; 4) Calcário argiloso fossilífero (Ordem Ostreoída) da Formação Pirabas.

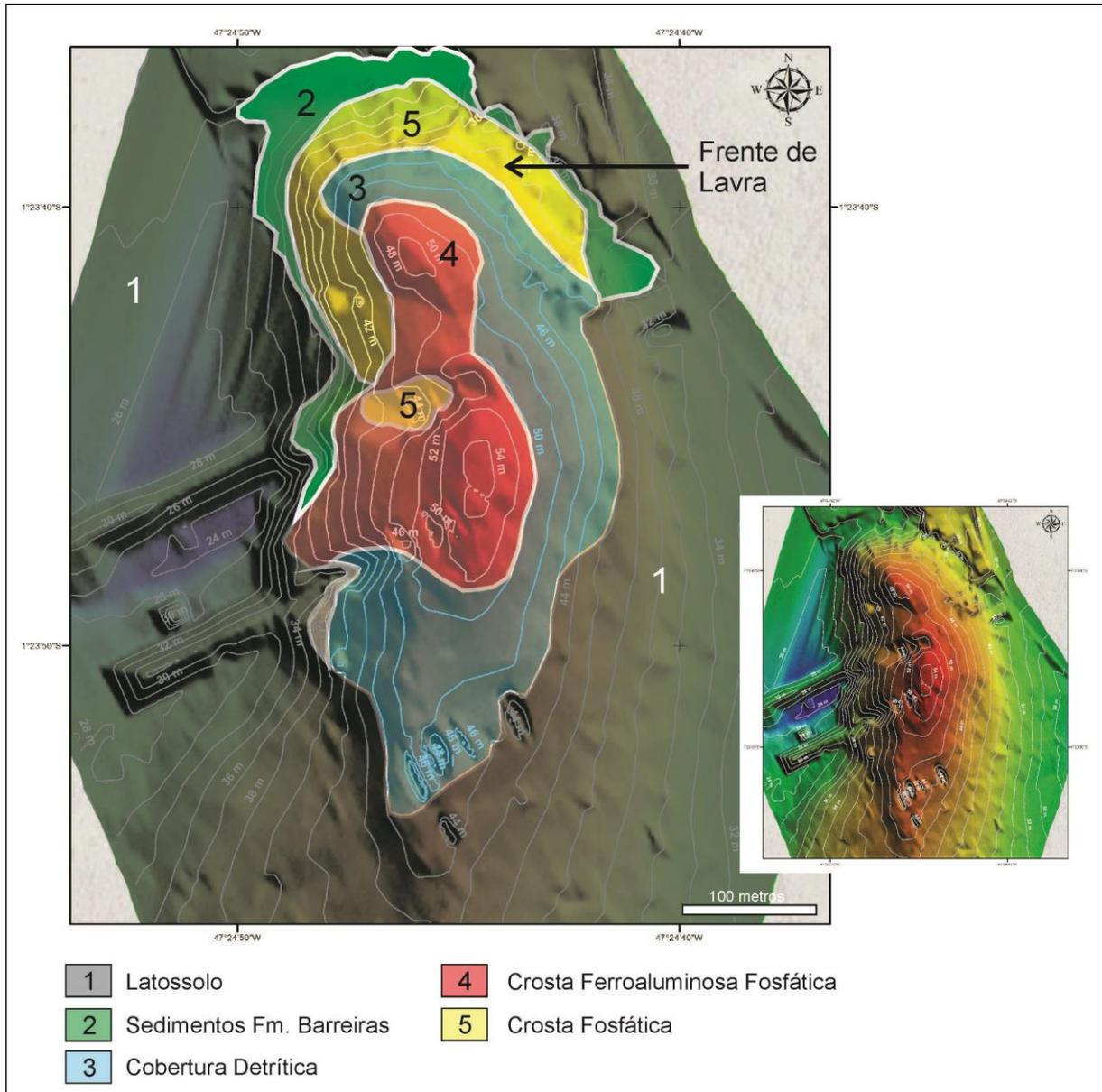


Figura 10 – Mapa litológico ilustrando a distribuição em superfície dos horizontes lateríticos que formam o Morro Sapucaia, com encostas mais suaves a leste e mais abruptas a oeste. Ao norte, a crosta aluminofosfática e sedimentos da Formação Barreiras foram expostos devido as escavações das obras civis ligadas a mina.

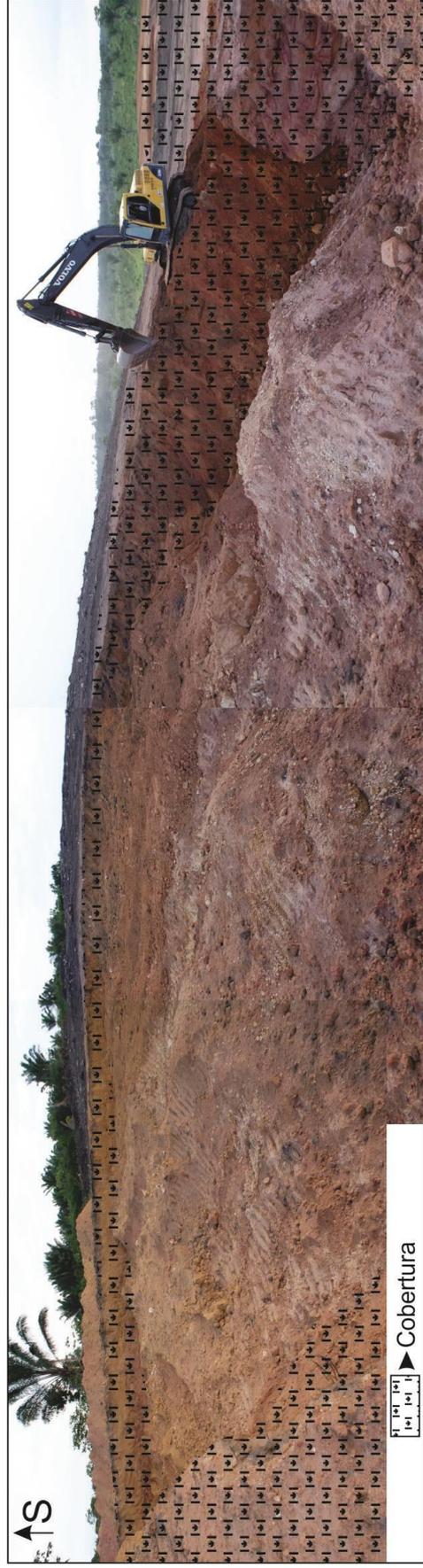


Figura 11 – Vista do depósito de fosfatos de Sapucaia, destacando a expressiva cobertura sedimentar (interpretada como Formação Barreiras) lateritizada na fase imatura e então transformada parcialmente em latossolos arenosos amarelos. Aqui o minério fosfatado é o substrato dos sedimentos Barreiras e aflora na base da escavação feita pela retroscavadeira.

6.2.2 Horizonte Fosfático ou Crosta Fosfática

Apresenta-se em coloração cinza clara, branca ou ligeiramente amarelada, compacto, mas micro cavernoso a cavernoso, duro, formando crosta extensa e/ou agregados de crostas circundados por material argiloso (Figura 13). Trata-se de uma massa criptocristalina e microcristalina, de aspecto bandado grosseiro e irregular, sugerindo a formação a partir de material coloidal (Figura 14). A espessura do horizonte é variável, comumente se situando entre 2 e 8 m, com contato gradual e irregular com o horizonte argiloso subjacente e da mesma forma com a crosta ferroaluminosa fosfática no topo. Este horizonte sustenta a forma do relevo em morro.

6.2.3 Crosta Ferro-Aluminosa Fosfática

É uma feição típica, delineada por uma matriz idêntica a do Horizonte Fosfático, cimentando esferólitos centimétricos (nódulos, concreções e pisólitos) vermelhos a marrons, formados por oxi-hidróxidos de ferro, equivalente às crostas conhecidas como pele-de-onça (Figuras 15a e 15b). O contato entre os esferólitos e a matriz embora abrupto, envolve uma película milimétrica de tonalidade mais clara. Vênulas de fosfatos de alumínio em direções diversas também seccionam esses esferólitos, além da presença de fosfatos de alumínio finamente dispersos no interior dos mesmos. Localmente desenvolveram-se cavidades centimétricas, revestidas tanto por cristais milimétricos de fosfatos de alumínio ou de oxihidróxidos de ferro, ou ainda de material ocre criptocristalino (Figuras 15c e 15d). A espessura da crosta ferroaluminosa fosfática não ultrapassa 2m e sua distribuição está restrita a uma parte do topo do morro. Em geral se encontra parcialmente desmantelada e alterada quimicamente para solos amarelos envolvendo os fragmentos centimétricos da mesma. Por vezes, forma zonas de centenas de metros de extensão, constituídas por esferólitos e/ou fragmentos suportados por matriz areno-argilosa amarela de composição fosfática a argilosa.

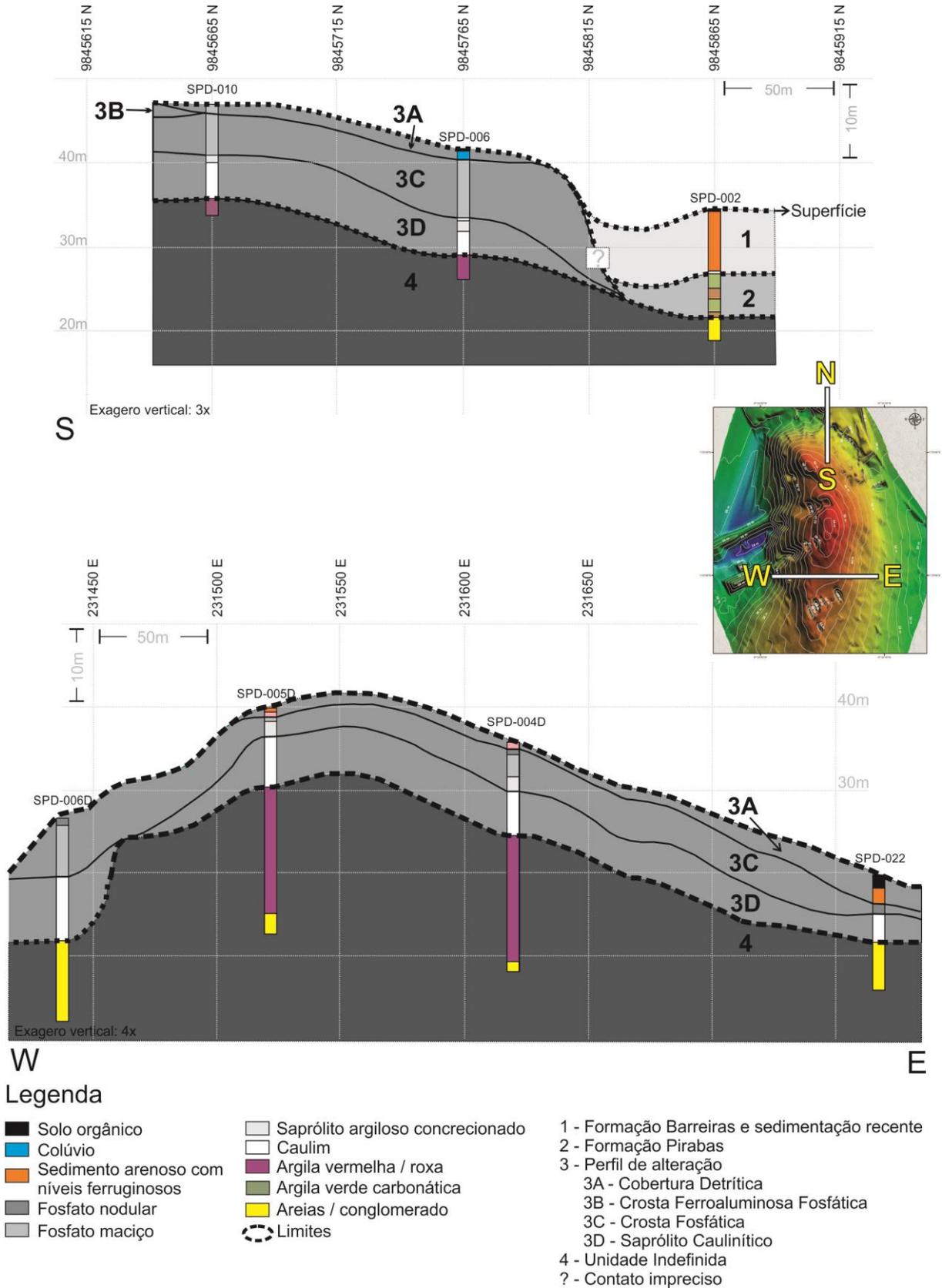


Figura 12 – Seções geológicas da sucessão de horizontes do perfil laterítico de Sapucaia e coberturas e sua situação espacial apresentada no mapa topográfico.

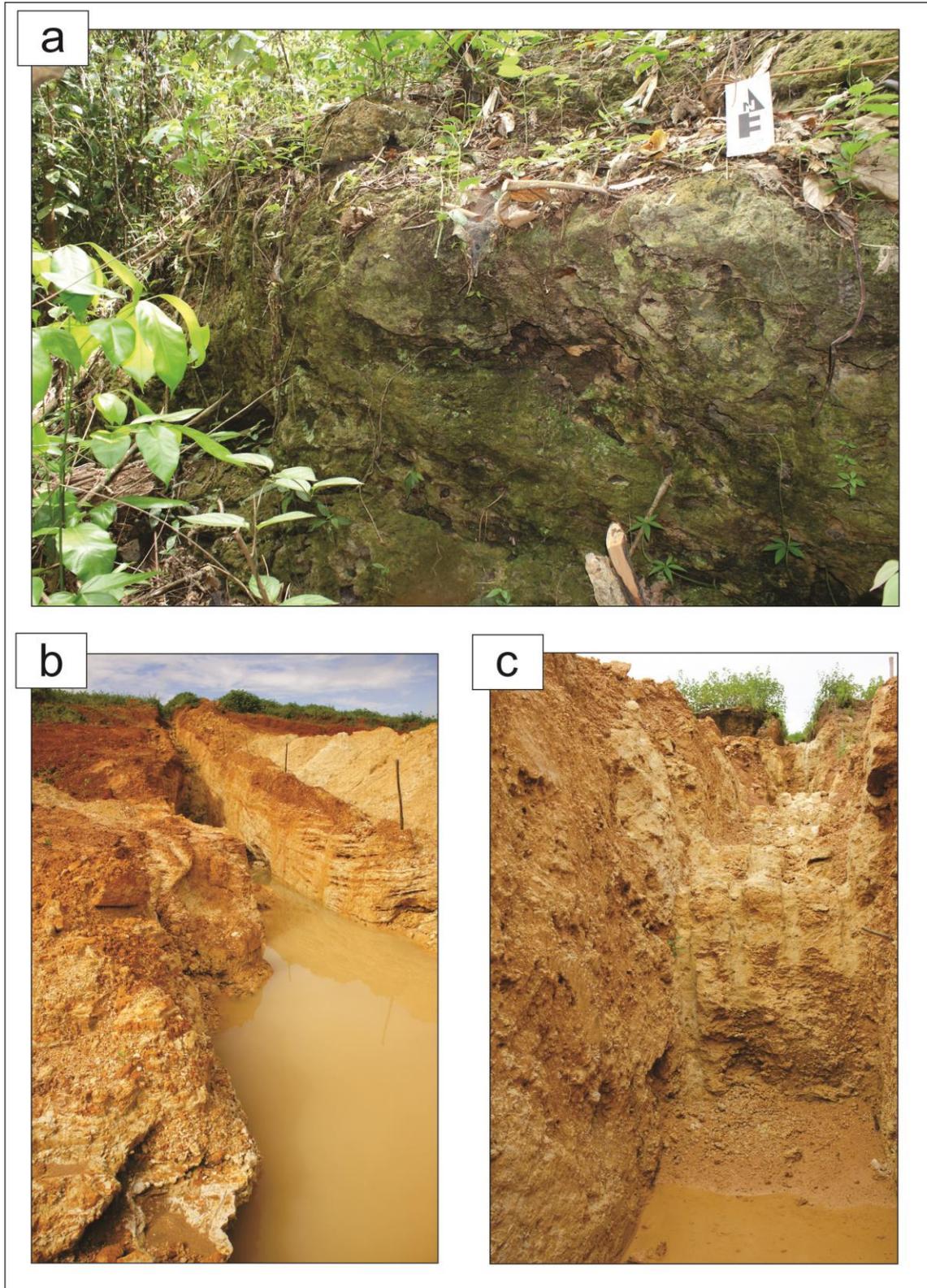


Figura 13 – Imagens de diferentes exposições dos fosfatos do depósito do Morro Sapucaia. A) Afloramento natural da crosta fosfática, cuja ocorrência é rara. B e C) Trincheiras localizadas na borda do Morro Sapucaia, onde são expostas a cobertura detrítica e o topo do horizonte fosfático, de fosfatos de alumínio.

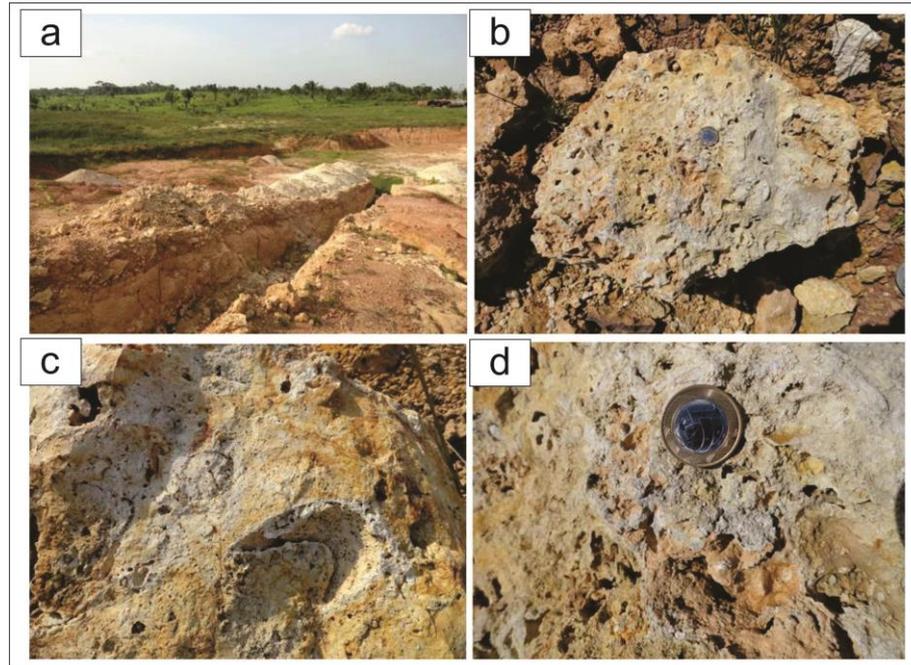


Figura 14 – A) Vista geral da área da jazida de fosfatos de Sapucaia, em que uma trincheira expõe a crosta fosfática recoberta por colúvios e pelos sedimentos da Formação Barreiras; B) A crosta fosfática maciça a cavernosa cinza a amarela; C) Detalhe da crosta fosfática anterior; D) Outro detalhe da crosta fosfática semelhante ao calcário Pirabas (Imagens: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa).

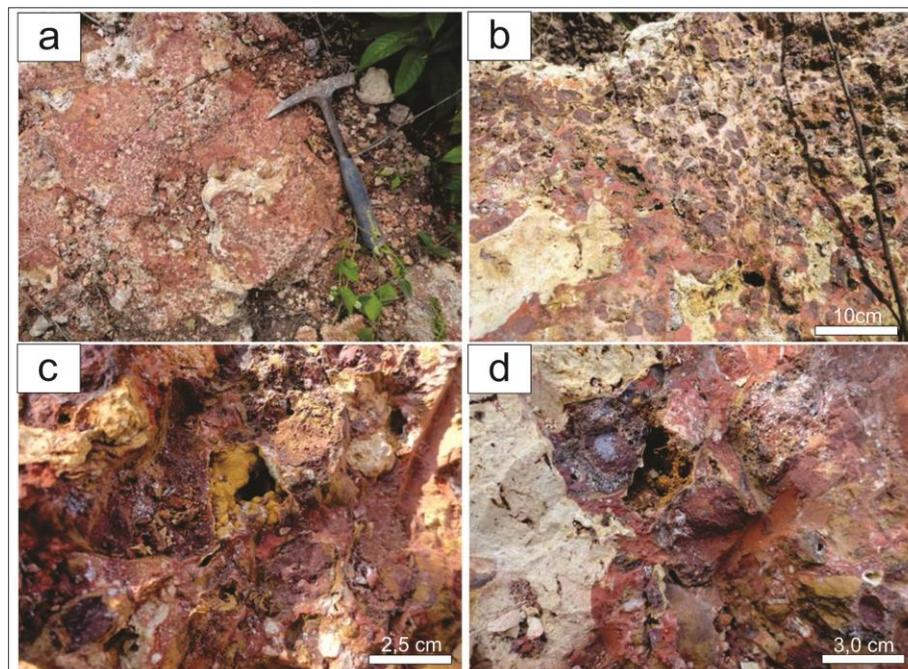


Figura 15 – Aspectos texturais da crosta ferro-aluminosa fosfática do Morro Sapucaia. A) Com textura tipo pele-de-onça; B) Detalhe da textura pele-de-onça; C) Cavidade centimétrica ao centro com cristais milimétricos de fosfatos de alumínio; D) Cavidades centimétricas revestidas por microcristais de fosfatos e hidróxidos de ferro (Imagens: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa).

6.2.4 Coberturas

Na jazida de fosfatos do Morro Sapucaia as coberturas são variadas. Destaca-se a cobertura detrítica, mineralizada em fosfatos de alumínio, mas rica em quartzo como matriz arenosa dos fragmentos de fosfatos. A mais antiga está limitada às porções restritas da base do morro, sendo representada pelos calcários argilosos da Formação Pirabas, já mencionados anteriormente, e que por sua vez encontram-se recobertos por sedimentos arenoargilosos da Formação Barreiras modificados por lateritização imatura, e por colúvios provenientes das encostas do morro, geralmente fragmentos das crostas na forma de cascalho imersos em matriz arenosa (Figura 16). Solos arenoargilosos amarelos tipo Latossolos são também encontrados localmente nas encostas do morro, ora sobre a crosta fosfática, ora sobre a Formação Barreiras lateritizada (Figura 17).

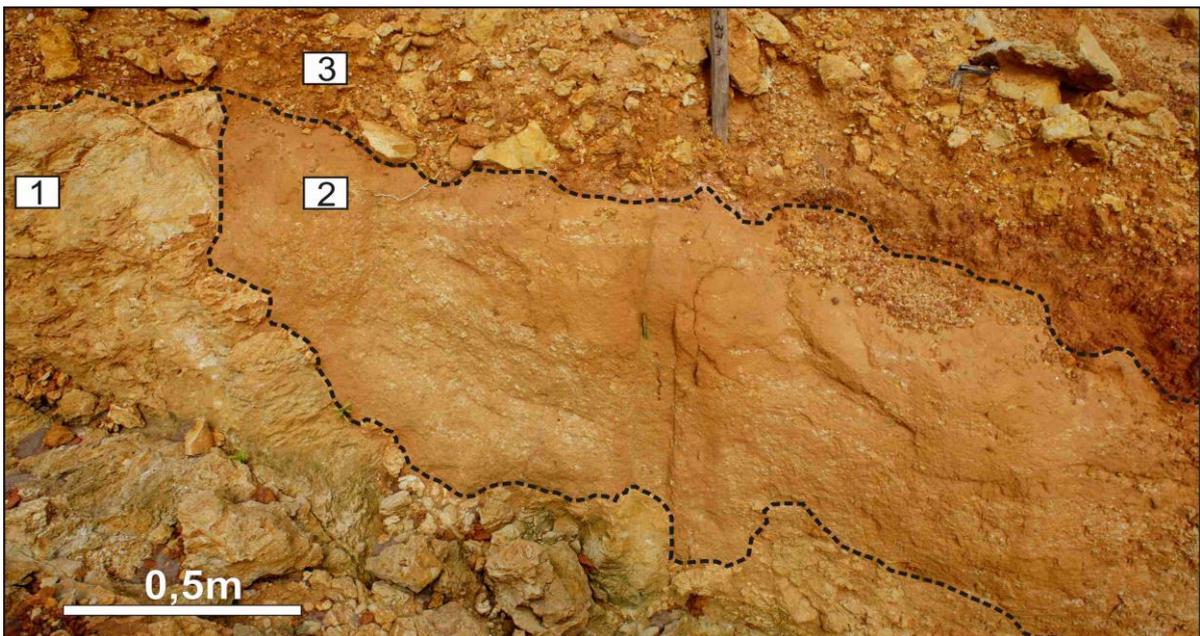


Figura 16 – Exemplo de colúvios (3) formados por fragmentos de crosta fosfática depositados tanto sobre a crosta fosfática (1) como sobre os sedimentos heterolíticos da Formação Barreiras (2).

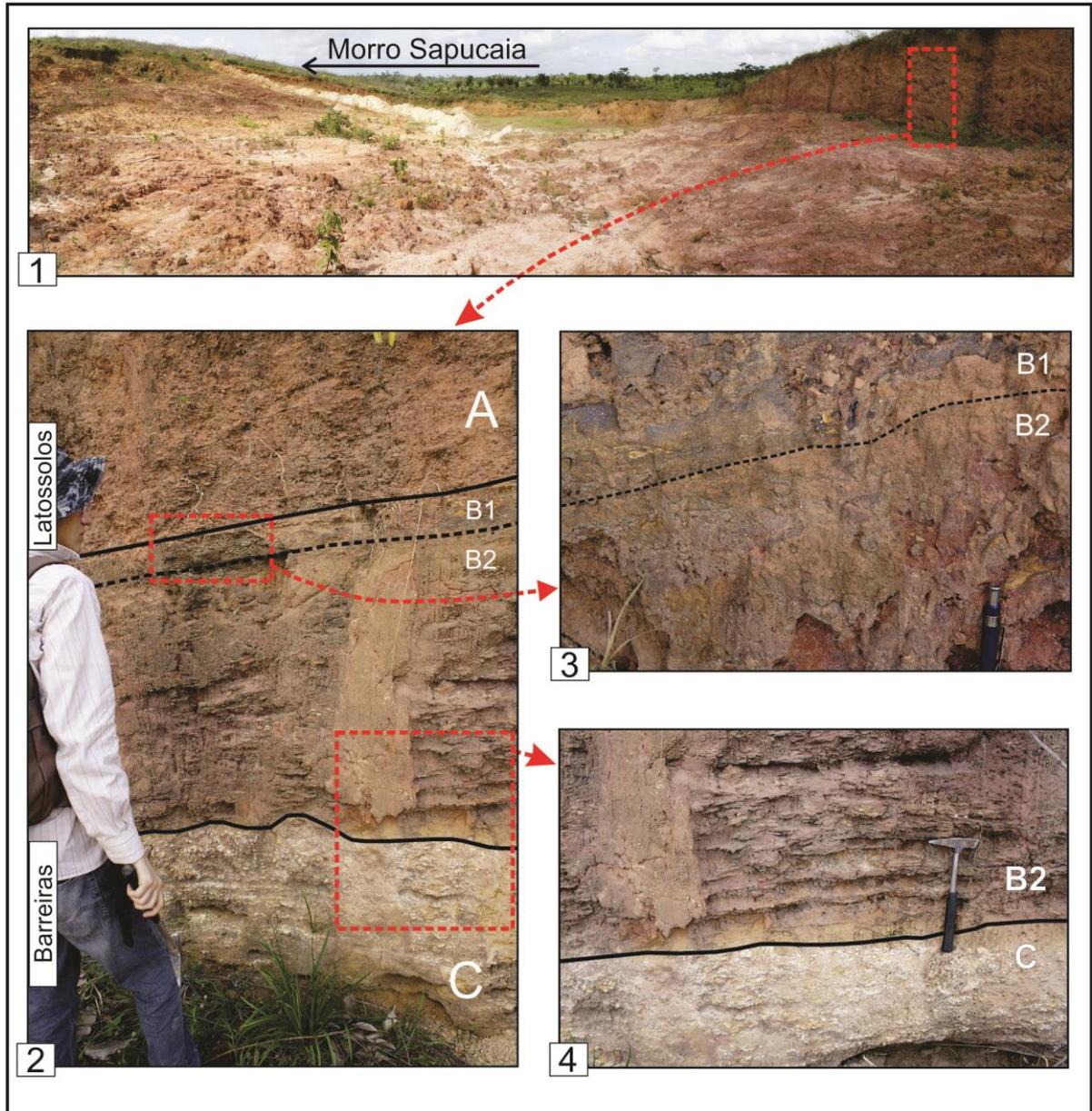


Figura 17 – Exposições da Formação Barreiras no Morro Sapucaia mostrando seus diferentes aspectos litológicos, intercalações e alteração laterítica imatura, os quais recobrem parcialmente os fosfatos. 1) Visão panorâmica de escavação na face norte da jazida; 2) Detalhe: Sucessão de argilitos a siltitos laminados, esbranquiçados, caulíníticos na base (C), sucedidos por ritmitos de arenitos e argilitos marrons avermelhados, equivalente ao horizonte mosqueado (B2); que converte gradualmente (B1) para arenitos argilosos enriquecidos em oxihidróxidos de ferro, na forma de “concreções lamelares” nos contatos litológicos e ainda como concreções, correspondendo ao horizonte ferruginoso de laterito imaturo (A); solos arenoargilosos recobrem parcialmente o horizonte ferruginoso; 3) Detalhe do contato entre os horizontes mosqueado e ferruginoso; 4) Detalhe da zona de contato entre zona caulínítica e os ritmitos mosqueados.

6.3 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

A constituição mineralógica do perfil laterítico mineralizado em fosfatos, determinada principalmente por DRX (Figuras 18 a 22) compreende: quartzo, caulinita, muscovita, crandallita-goyazita, woodhouseita-svanbergita, wardita-millisita, wavellita, hematita, goethita e anatásio. A distribuição desses minerais é fortemente dependente de cada horizonte, de igual forma que em outros perfis lateríticos, e se equivale aos demais lateritos fosfáticos da região (Costas, 1980; Costa 1982). Quartzo, caulinita e muscovita, além de goethita e hematita são os principais constituintes do horizonte argiloso saprolítico, enquanto os fosfatos crandallita-goyazita, woodhouseita-svanbergita e wardita-millisita são os constituintes dominantes da crosta fosfática e da crosta ferroaluminosa fosfática que, no entanto são acompanhados por hematita e goethita em maior abundância, principalmente a hematita. Wavellita foi identificada apenas como cristais submilimétricos nas microcavidades das crostas ferroaluminosas fosfáticas.

Esta distribuição está muito bem ilustrada através dos difratogramas de raios X para vários perfis. Os teores médios e suas variações em cada constituinte mineral estão indicados na tabela 2 e a sua distribuição quantitativa representada nas figuras 23 a 25. Crandallita-goyazita é o principal mineral de minério seguido por woodhouseita-svanbergita, que por sua constituição química, tem teor mais baixo de fósforo. Os dados são comparáveis aqueles obtidos por Costa & Costa (1987), os descobridores de Sapucaia e Boa Vista, contudo estes autores realizaram apenas amostragem pontual (Tabela 3). Esta é a primeira vez que se identifica a ocorrência de woodhouseita-svanbergita nos depósitos de fosfatos lateríticos do Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão.

Tabela 2 – Composição mineralógica centesimal agrupada segundo os horizontes lateríticos analisados.

HORIZONTE	FASE		Crandallita	Goyazita	Woodhouseíta Svanbergita	Wardita Millisita	Caulinita	Muscovita	Goethita Hematita	Anatásio	Quartzo
Colúvio Fosfático n=6	Min		3,2	1,2	1,0	0,0	7,3	0,3	0,9	0,6	12,4
	Max		35,4	13,7	15,7	1,0	26,1	1,4	8,9	1,5	64,2
	Med		22,2	8,6	5,6	0,6	13,4	0,7	4,4	1,1	39,1
Crosta Ferroaluminosa Fosfática n=3	Min		35,0	11,2	8,9	0,4	2,3	0,3	19,1	1,6	2,1
	Max		43,9	12,3	14,1	0,8	6,1	0,9	21,2	1,9	9,3
	Med		38,0	11,8	11,4	0,6	4,8	0,6	19,9	1,7	4,6
Crosta Fosfática n=29	Min		15,8	5,3	3,3	0,4	0,1	0,0	0,7	0,2	0,7
	Max		67,4	22,5	32,1	42,5	26,9	3,8	8,7	2,5	24,0
	Med		43,0	14,3	15,8	5,1	5,9	0,9	2,1	0,8	9,6
Saprólito Caulínítico n=6	Min		0,2	0,1	0,0	0,0	21,9	0,7	1,2	0,4	7,3
	Max		3,4	3,2	2,3	0,4	79,3	6,4	7,6	1,1	66,7
	Med		1,7	1,1	0,7	0,1	52,1	2,1	2,8	0,8	36,8

Tabela 3 – Composição mineralógica (% em peso) dos lateritos fosfáticos do Morro Sapucaia segundo Costa & Costa (1987). Os valores da crosta fosfática representam a média aritmética das amostras analisadas.

HORIZONTE	FASE	Crandallita	Goyazita	Florencita	Wardita	Caulinita	Muscovita	Goet/Hem	Anatásio	Quartzo	Outros
Crosta Ferruginosa (n=1)		28,9	5,5	XX	XX	14,6	3,8	39,5	1,6	XX	7,0
Crosta Fosfática (n=3)*		45,9	19,9	2,5	7,0	10,2	4,7	2,3	1,1	4,9	1,0
Horziente Argiloso (n=1)		1,1	1,2	0,1	XX	69,0	21,9	1,3	1,7	3,5	XX

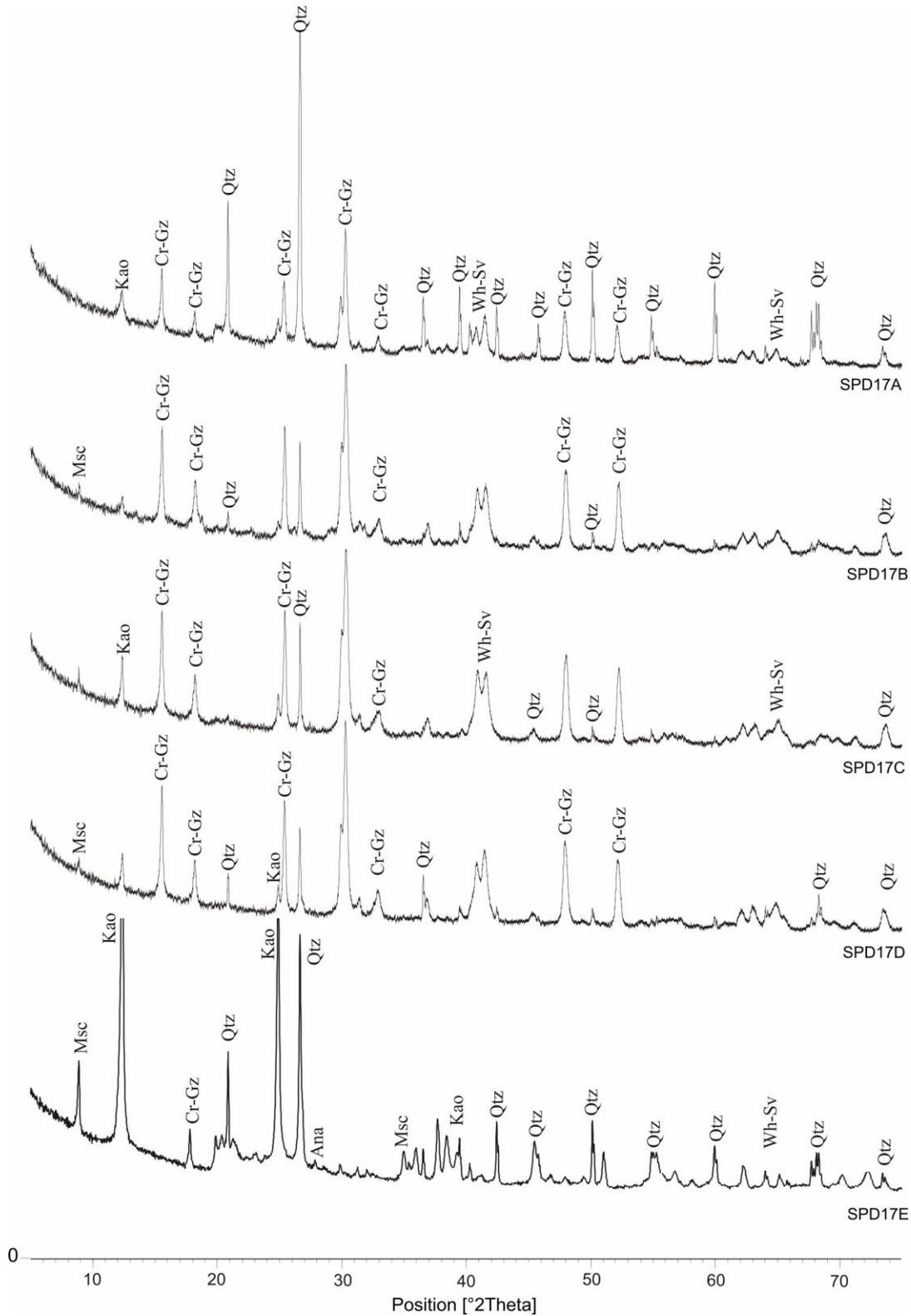


Figura 18 – Difratoograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-17 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisitita; Ana: anatásio.

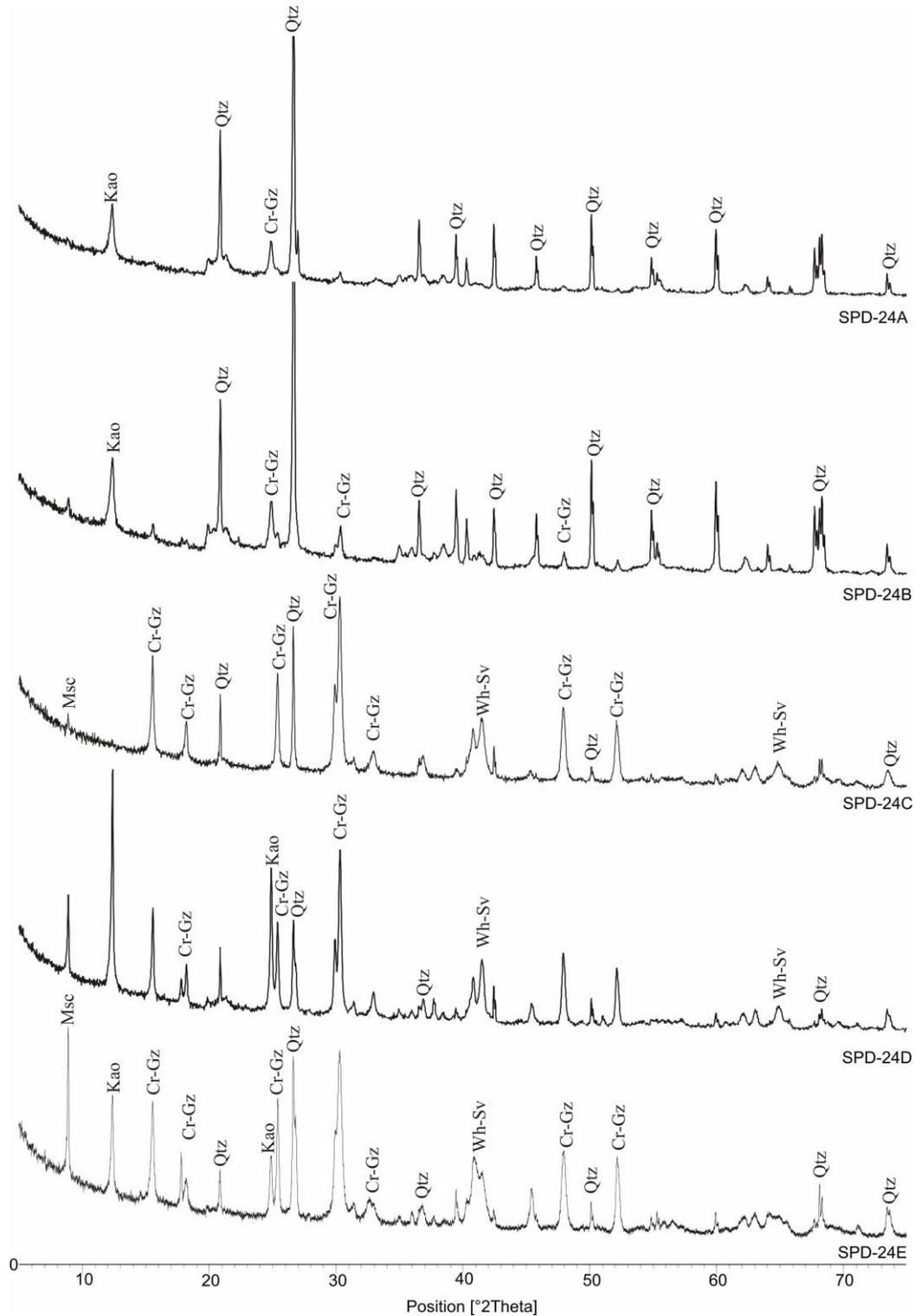


Figura 19 – Difratoograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-24 (A: no topo, E: na base). .Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisita; Ana: anatásio.

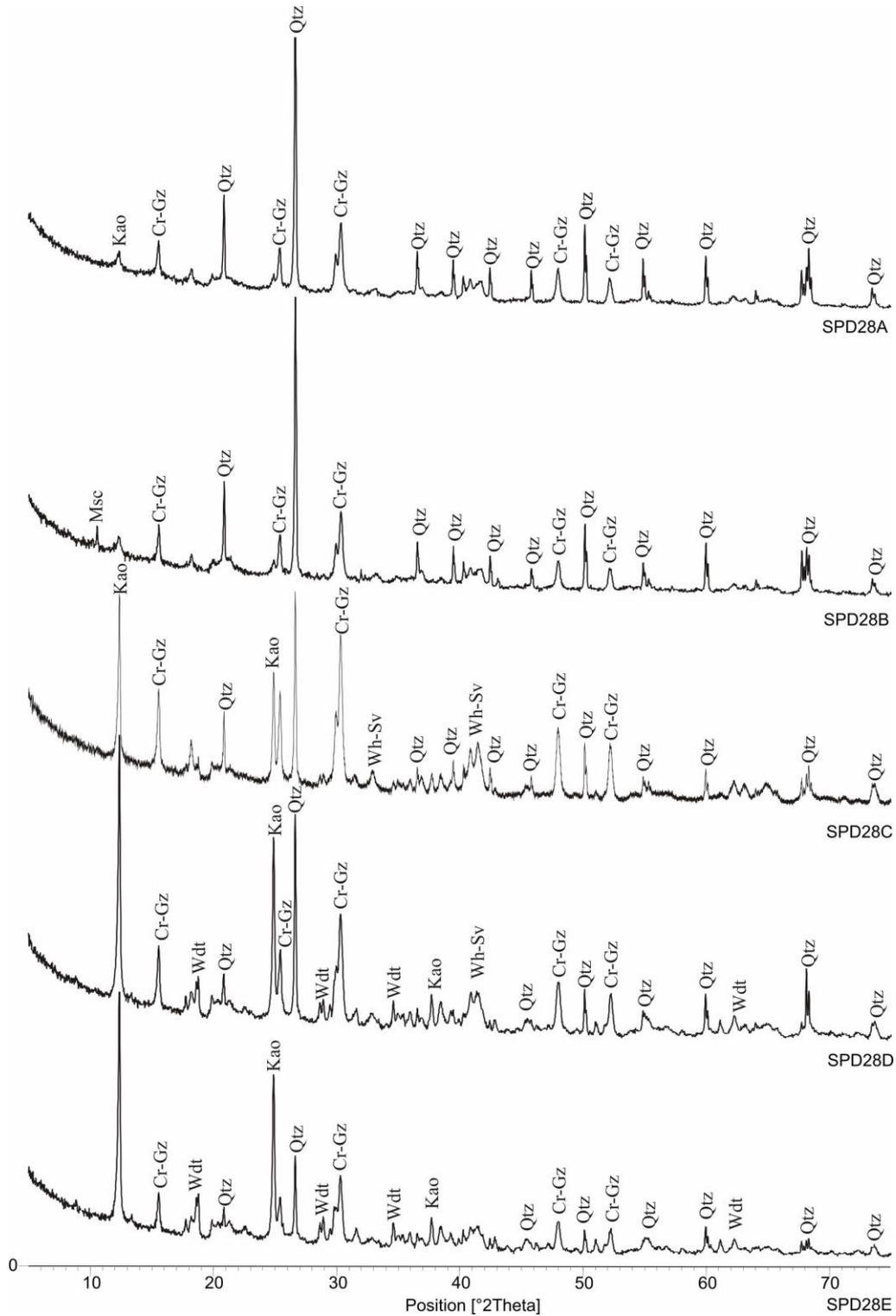


Figura 20 – Difratoograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-28 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millissita; Ana: anatásio.

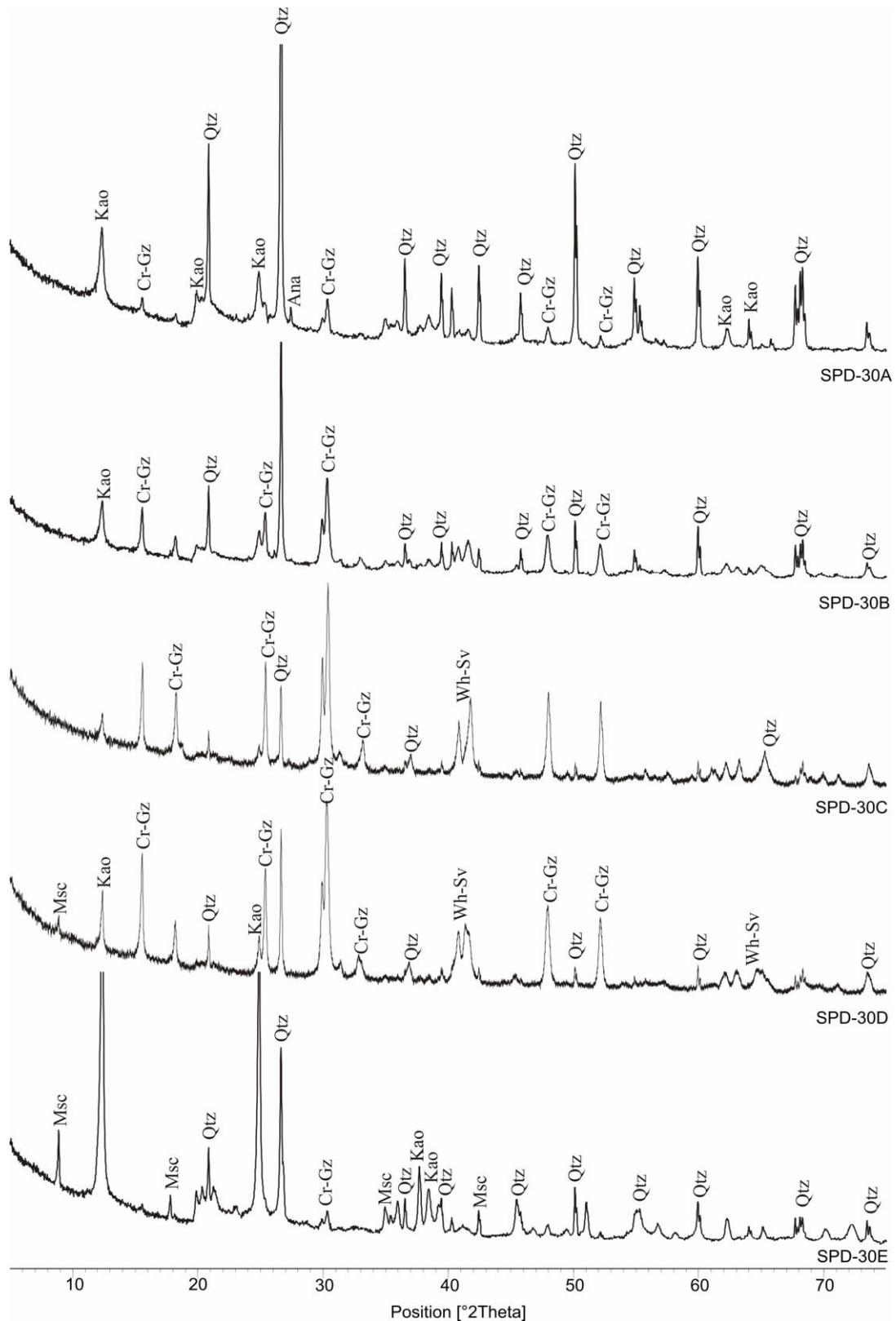


Figura 21 – Difratoograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-30 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisita; Ana: anatásio.

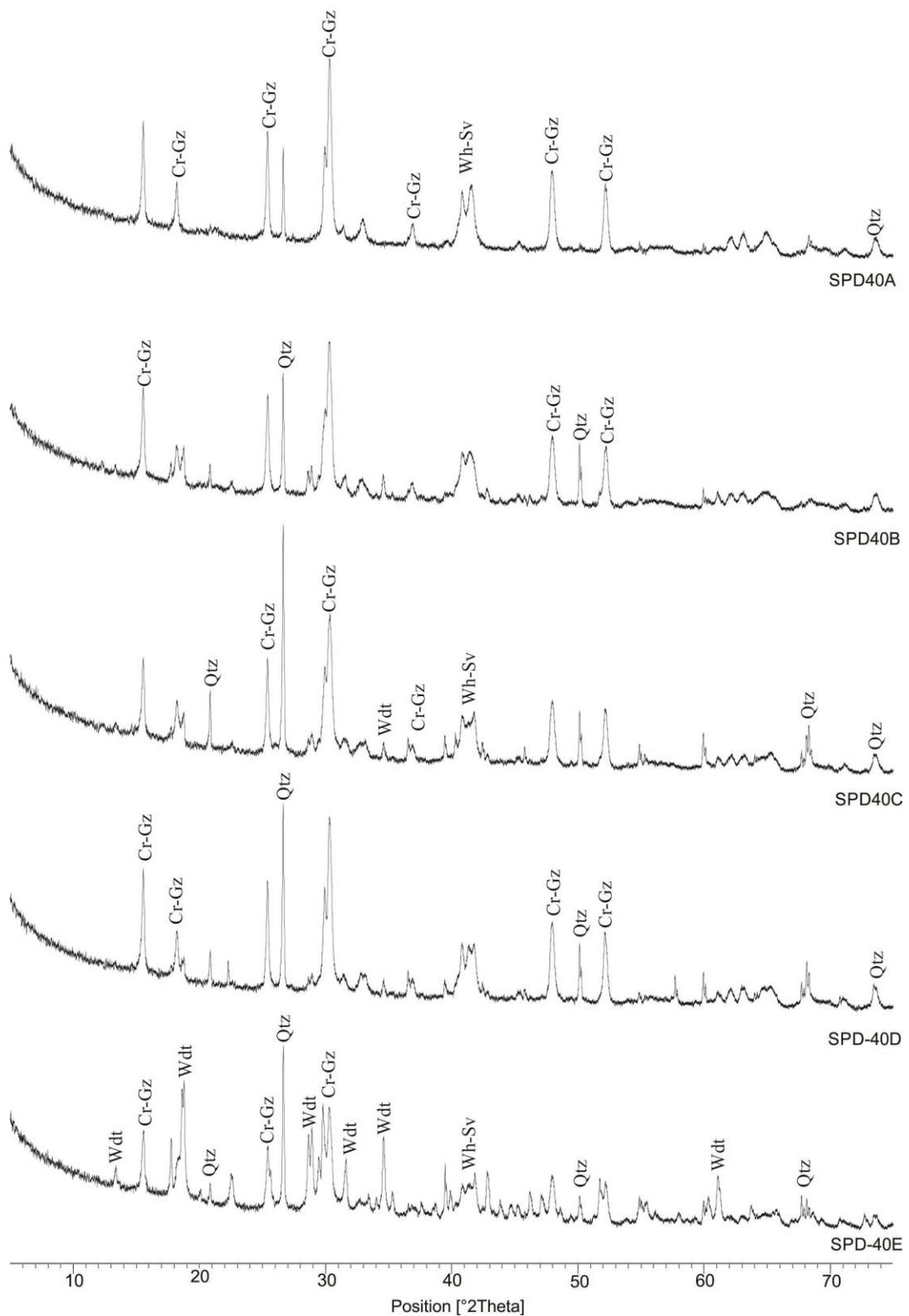


Figura 22 – Difratoograma de raios X de amostras do perfil do furo de sondagem SPD-40 (A: no topo, E: na base). Msc: muscovita; Kao: caulinita; Qtz: quartzo; Cr-Gz: crandallita-goyazita; Wh-Sv: woodhouseita-svanbergita; Wdt: wardita-millisita; Ana: anatásio.

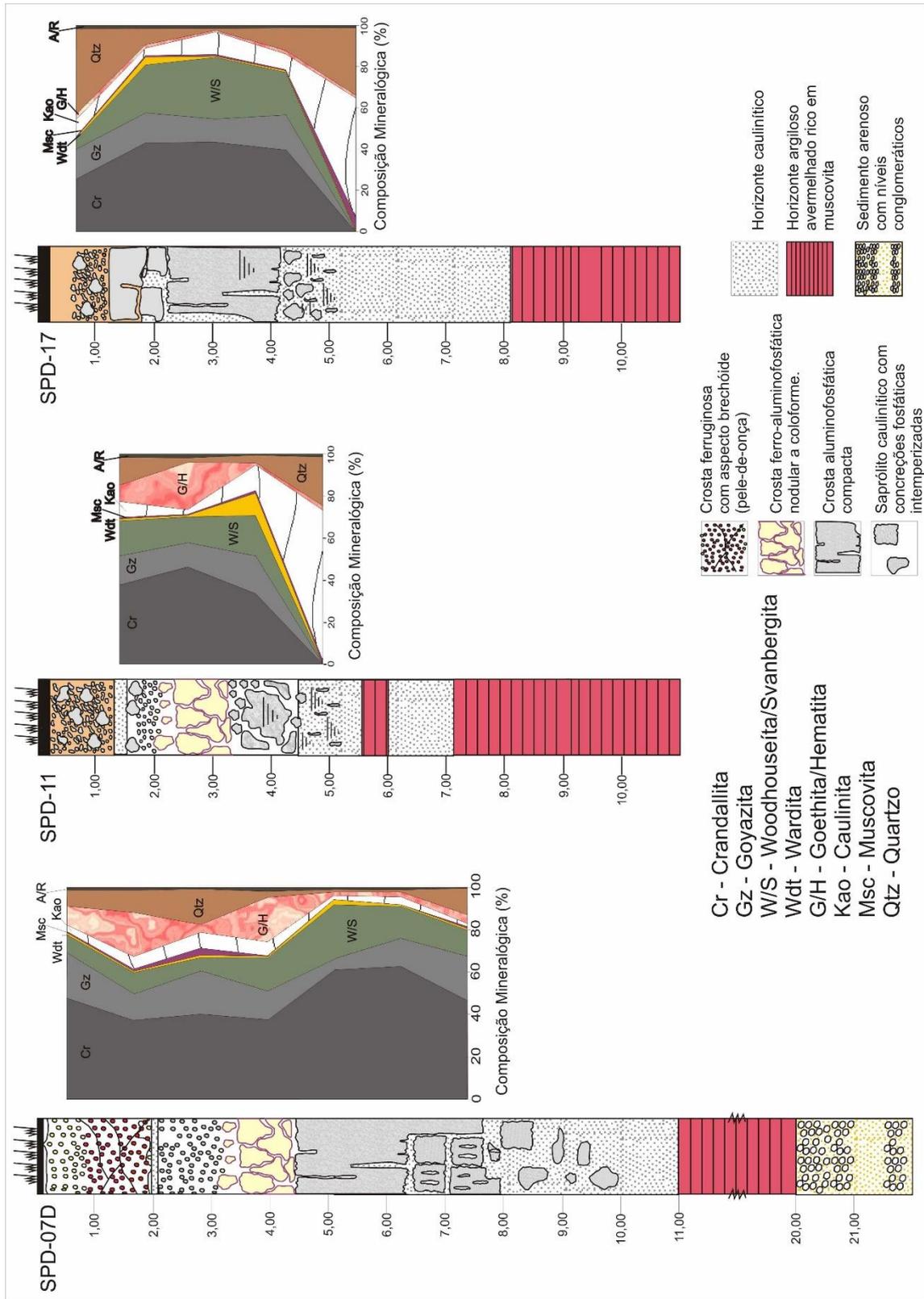


Figura 23 – Distribuição quantitativa dos minerais na zona mineralizada em fosfatos na porção superior dos perfis dos furos de sondagem SDP-07D, SPD-11 e SPD-17.

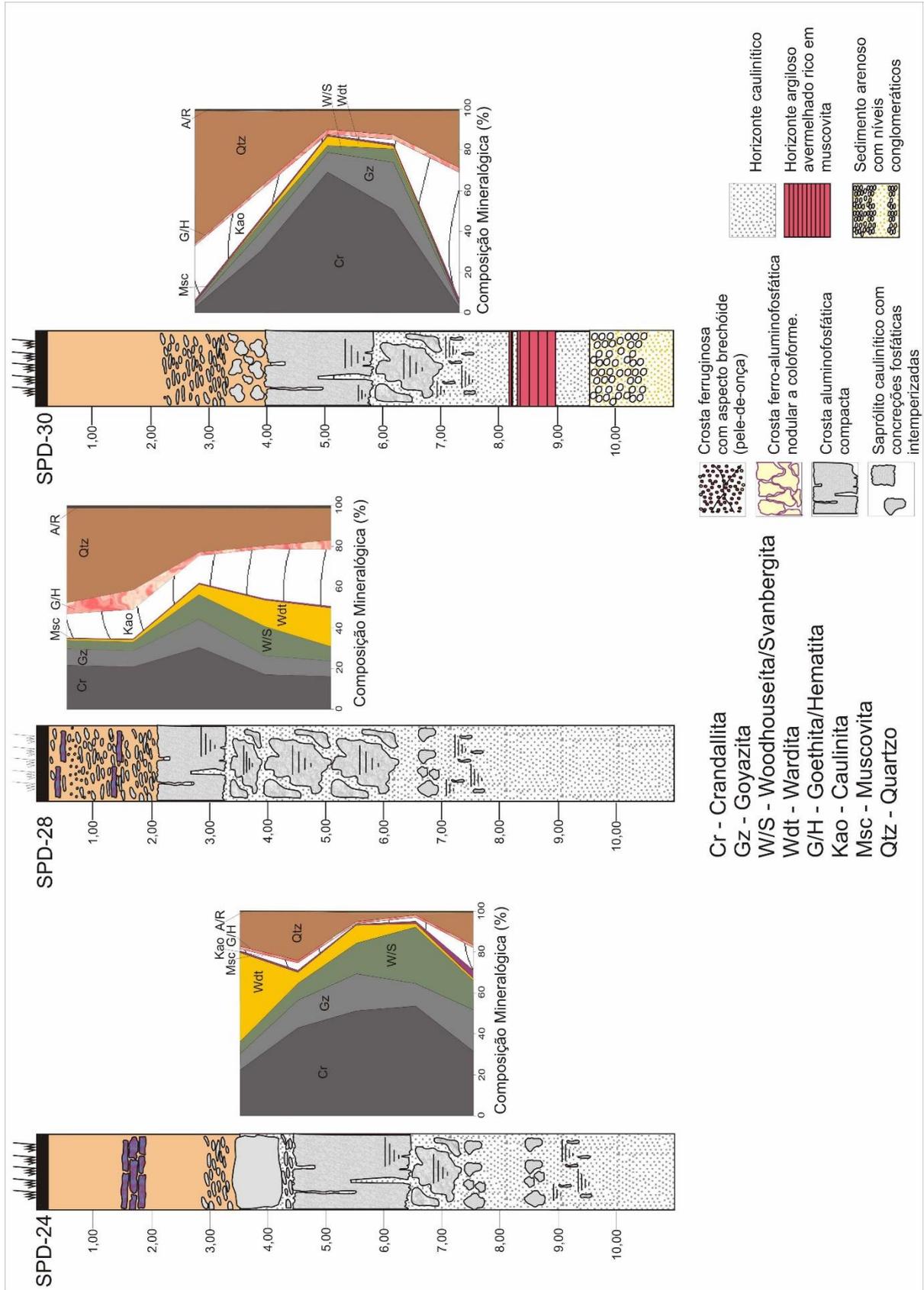


Figura 24 - Distribuição quantitativa dos minerais na zona mineralizada em fosfatos na porção superior dos perfis dos furos de sondagem SPD-24, SPD-28 e SPD-30.

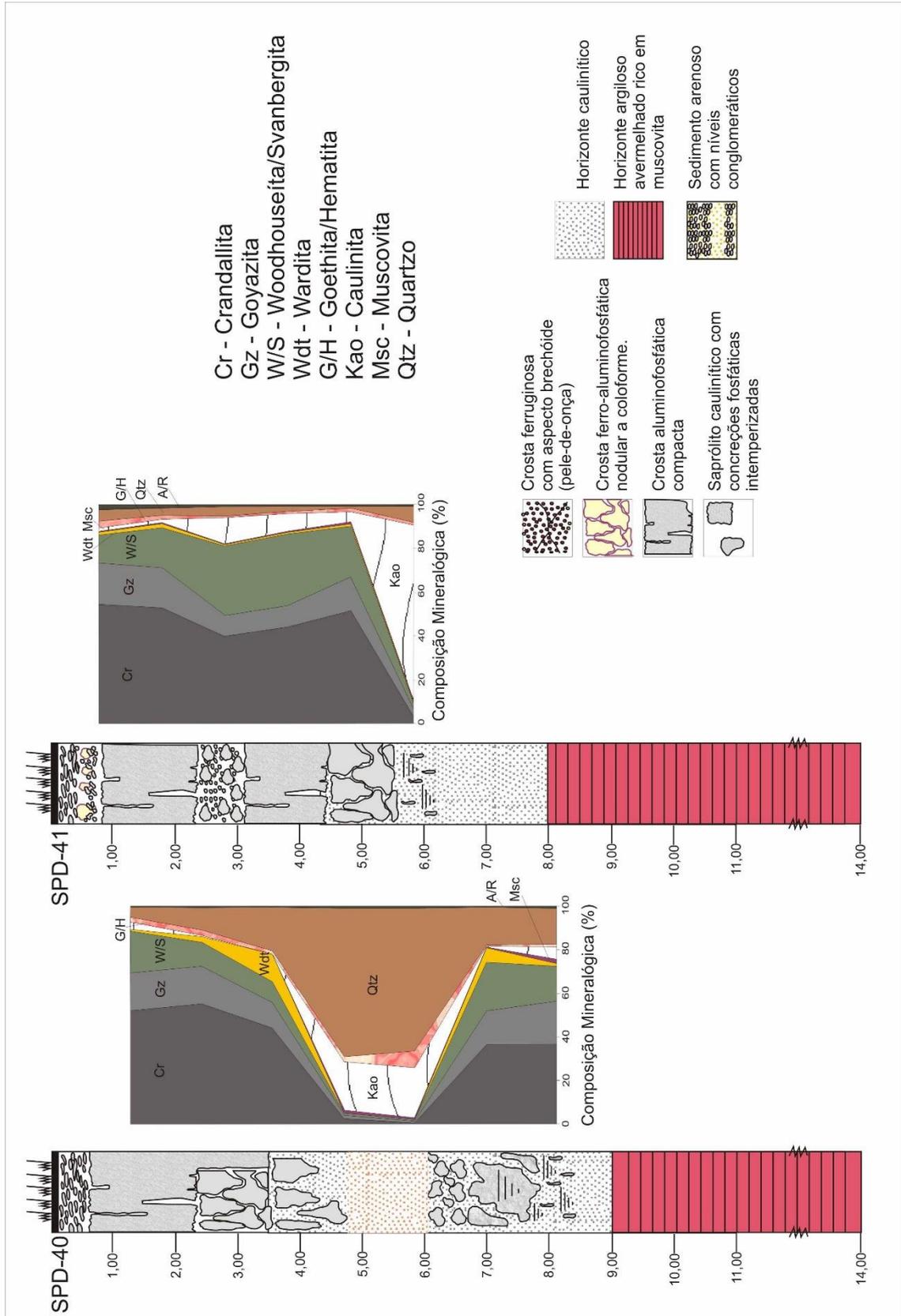


Figura 25 – Distribuição quantitativa dos minerais na zona mineralizada em fosfatos na porção superior dos perfis dos furos de sondagem SDP-40 e SPD-41.

Os fosfatos de alumínio do Morro Sapucaia vistos sob o prisma do estereomicroscópio se apresentam tipicamente como uma massa microporosa e microcristalina (Figura 26). A partir do microscópio ótico em lâminas delgadas, estes fosfatos inicialmente identificados por DRX, tanto crandallita-goyazita como woodhouseita-svanbergita, são criptocristalinos, em massa constituída por ambas as séries, onde a primeira predomina sobre a segunda e ao mesmo tempo envolve relictos de plaquetas de muscovita, de grãos de quartzo, e os minerais acessórios pesados como zircão, rutilo, turmalina, estaurolita, anatásio, entre outros (Figura 27). Essa massa apresenta característica de formação a partir de um plasma aluminoso mineralizado em P e S bem como em Ca e Sr. Em imagens de microscopia eletrônica observa-se que o plasma é na verdade constituído por agregados microcristalinos desses minerais (Figuras 28 e 29).

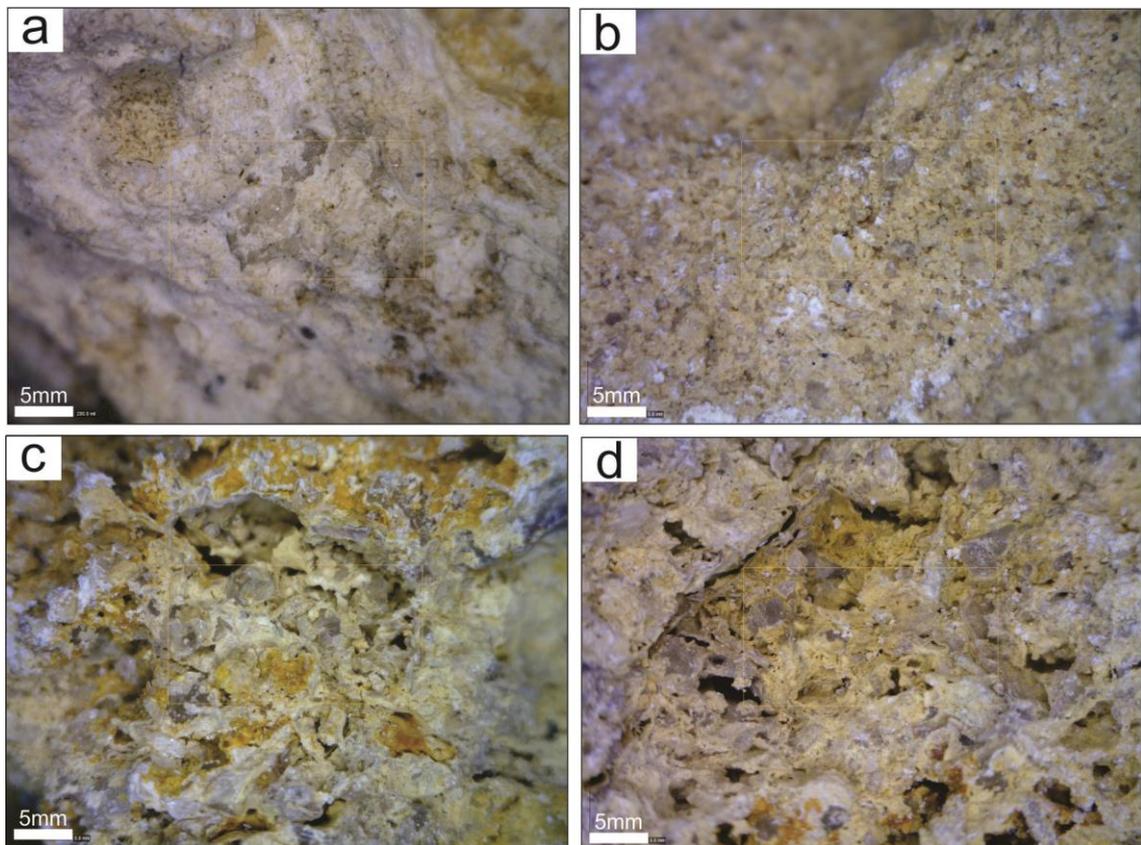


Figura 26 – Fotomicrografias obtidas com estereomicroscópio da Crosta Fosfática (CF), perfil SPD-30, ressaltando a textura maciça e localmente cavernosa. É possível observar grãos de quartzo imersos na matriz fosfática.

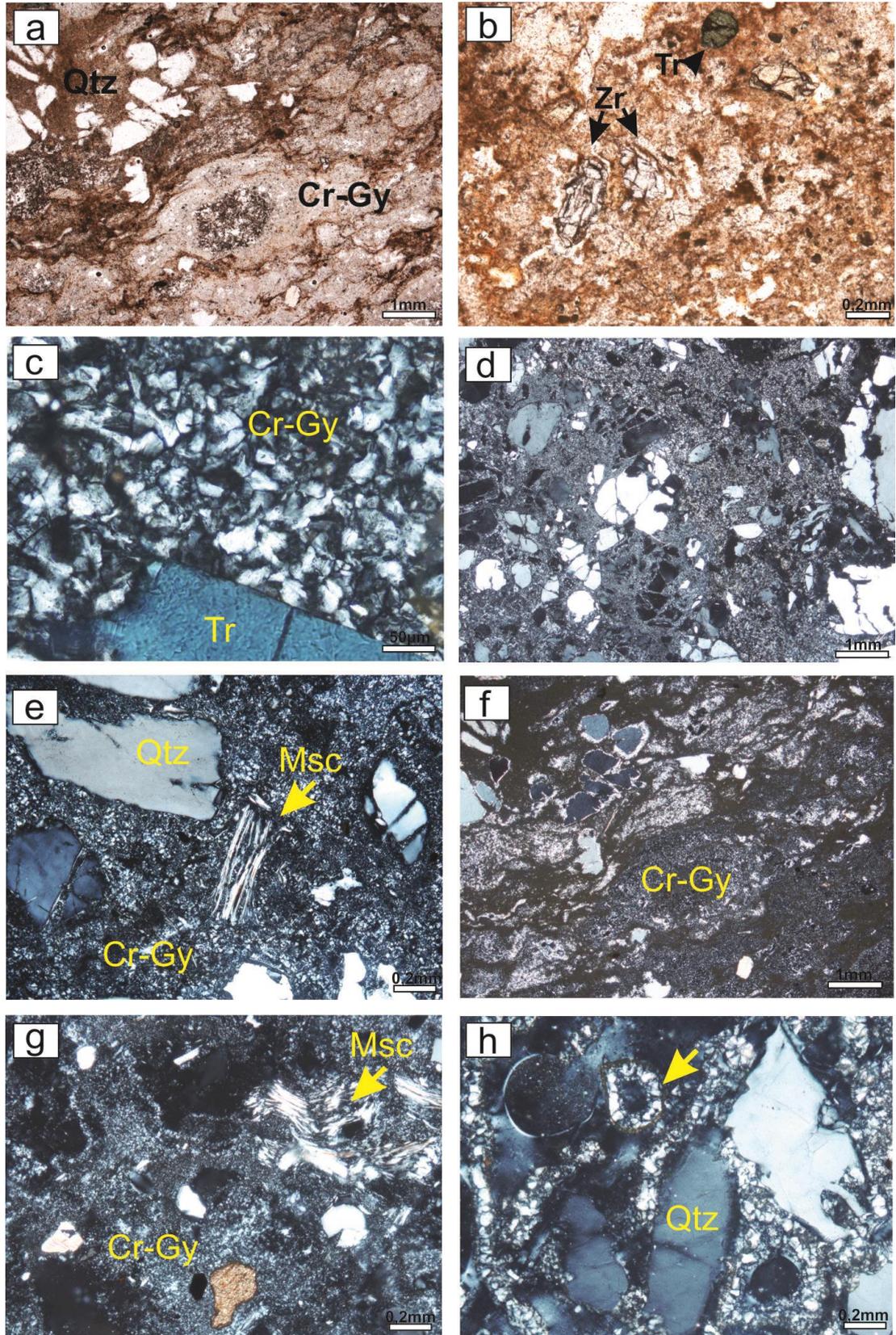


Figura 27 - Fotomicrografias em lâminas delgadas de amostras da Crosta Ferroaluminosa Fosfática (A-B) e Crosta Fosfática (C-H). Cr-Gy: crandallita-goyazita; Qtz: quartzo; Zr: Zircão; Tr: turmalina; Msc: muscovita.

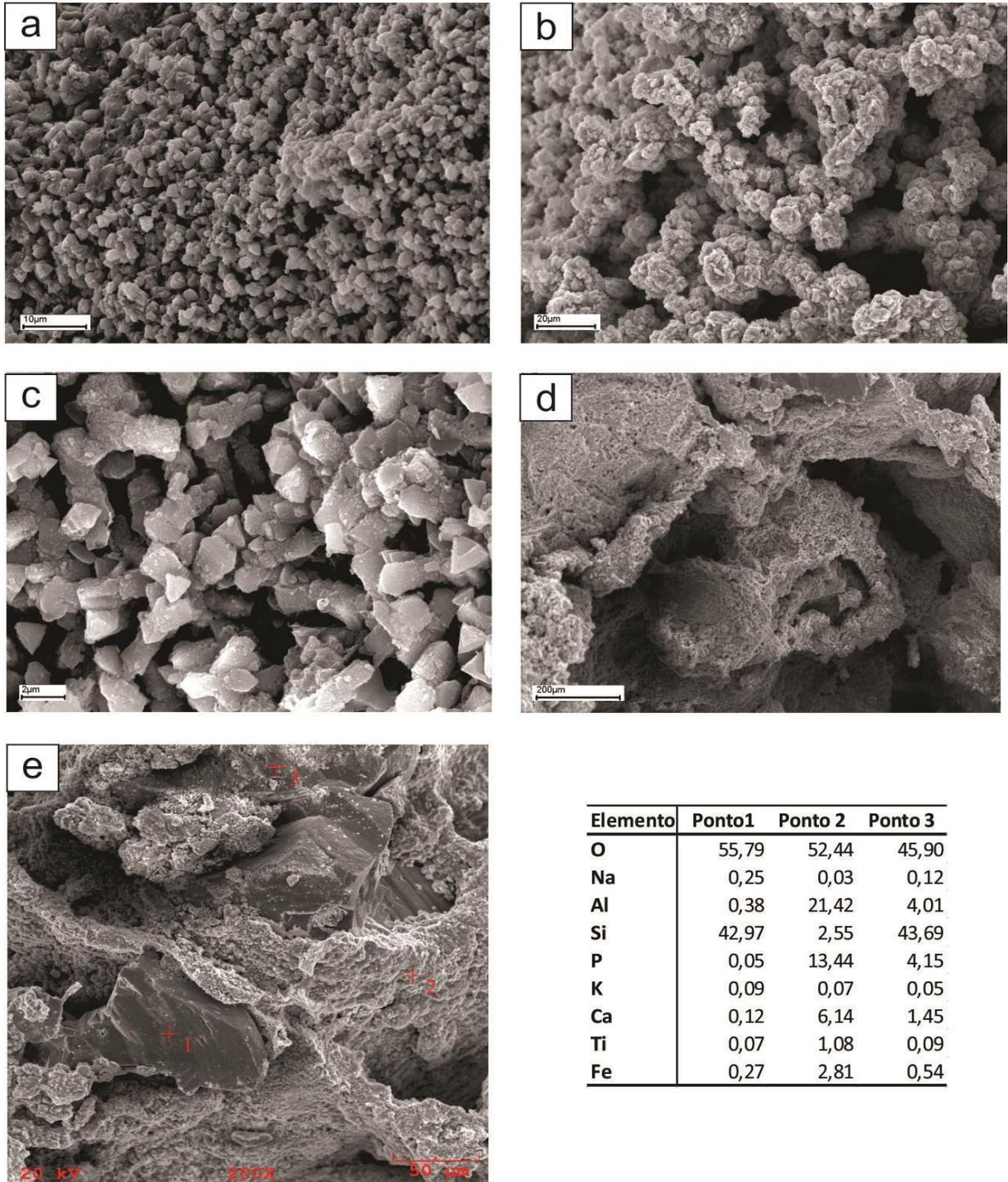


Figura 28 – Fotomicrografias de microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários. A-C) Diferentes cristallitos de crandallita-goyazita que compõem a matriz aluminofosfática; D) Textura porosa comum na crosta fosfática, em níveis de maior dissolução dos grãos de quartzo; E) Grãos de quartzo envolvidos a matriz aluminofosfática. Amostra SPD-30-C.

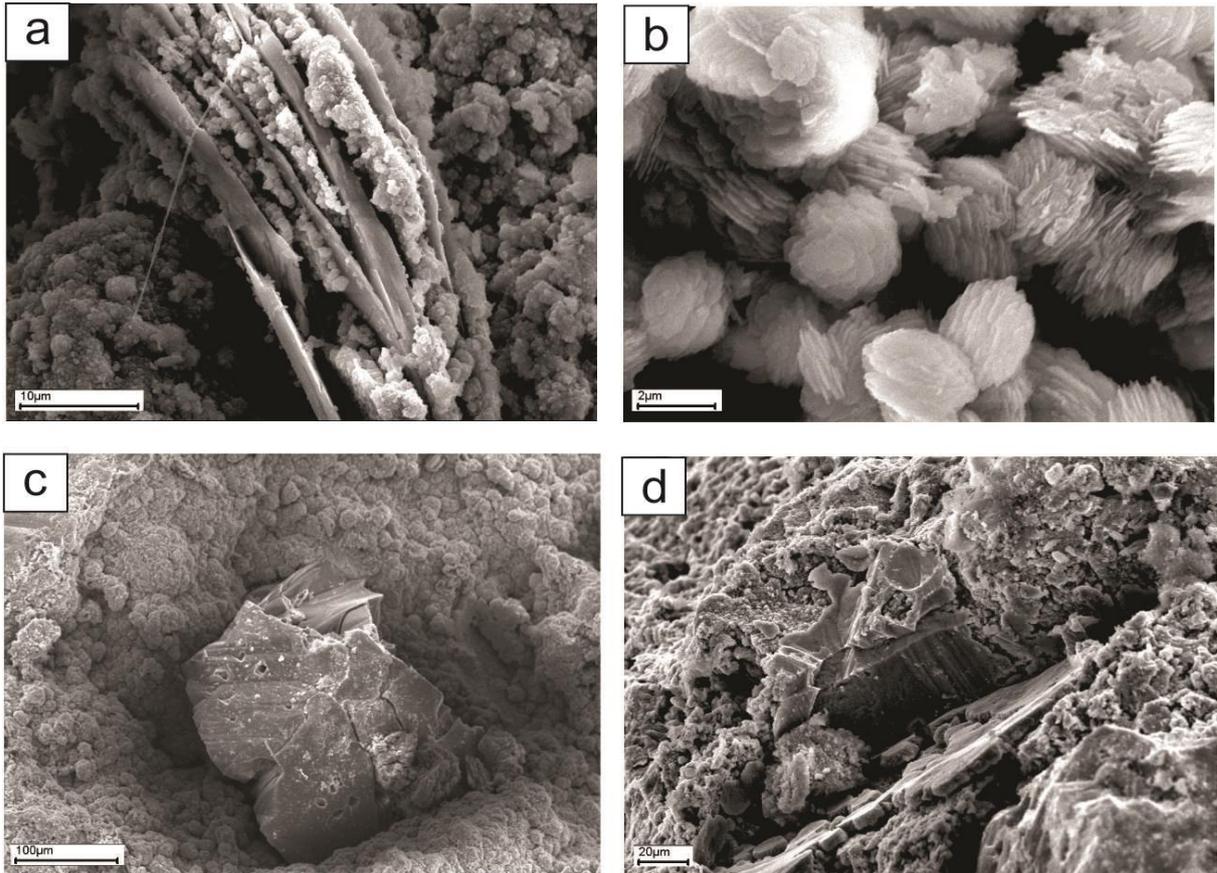


Figura 29 – Fotomicrografias de microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários. A) Muscovita com crescimento secundário de fosfatos de alumínio entre os planos de clivagem; B) Caulinita; C) Grão de quartzo no interior de cavidade na matriz predominantemente fosfática; D) Molde formado por plasma aluminofosfático.

6.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química média dos horizontes do perfil laterítico do Morro Sapucaia e, por conseguinte do minério fosfático deste depósito (horizontes denominados de crostas), retrata claramente uma formação laterítica mineralizada em fosfatos, como já demonstrada pela mineralogia, com a qual é plenamente compatível (Tabela 4). Os teores dos elementos maiores são comparáveis àqueles dos demais depósitos mineralizados em fosfatos da região do Gurupi, em especial de Itacupim, Jandiá e Trauíra, se confrontados com os dados de Costa (1980, 1982), Oliveira (1980), Costa & Sá (1980), Costa et al. (1980) e Schwab et al. (1983) e se afastam por completo da composição química da crosta terrestre (Figura 30). Os teores crescentes do horizonte saprolítico para as crostas (da base para o topo) de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 e TiO_2 e decrescentes de SiO_2 , MgO e K_2O (Figura 31) comportam a evolução laterítica.

No entanto os valores fortemente enriquecidos de CaO, SrO e mesmo Na₂O, bem como de SO₃, somente são verificados em perfis lateríticos mineralizados em fósforo, em que seus minerais sejam tipo crandallita-goyazita e woodhouseita-svanbergita (Dill et al., 1995; Toledo, 1999; Dill, 2001). Os valores mais altos restringem-se apenas na crosta fosfática, dominada pelos fosfatos supramencionados, além de wardita-millisita. Os contrastes entre os teores (fatores acima de 4) no horizonte saprolítico e nas crostas para P, S, Sr, Ca, Na, Fe e Si mostram (Tabela 4) que estes elementos sofreram mobilidade absoluta durante a formação do perfil, em que P, S, Sr, Ca, Na e Fe foram transportados e retidos, enquanto Si foi mobilizado e lixiviado. Por outro lado Al e Ti tem comportamento residual (fator inferior a 3). O material detrítico mineralizado (CD) apresenta alto teor de SiO₂ quando confrontado com as duas crostas (CF e CFF) e ainda rica em P₂O₅, CaO, SrO, SO₃, e em Fe₂O₃ perante a crosta fosfática. Portanto o material detrítico mineralizado representa uma mistura física de fragmentos das duas crostas, enquanto SiO₂, na forma de quartzo, foi incorporado a partir de fonte externa ao perfil laterítico, possivelmente dos sedimentos de cobertura.

Entre todos os elementos traços analisados V, Cr {Co, Ni, Cu}, Zn, Ga, As, Se, {Y, Zr, Hf, Th, U, ETR} aumentam de teores do horizonte argiloso para a crosta fosfática e para a ferroaluminosa fosfática, embora de forma distinta em termos de fatores e crosta. Co, Ni e Cu, no entanto encontram-se de forma geral em valores muito abaixo da média crustal, ainda assim apresentam enriquecimento que é maior na crosta ferroaluminosa fosfática, denotando uma forte ligação com os oxihidróxidos de ferro, em que os fatores elevados indicam enriquecimento absoluto equivalente ao do Fe. Os elementos U, W, As, Se, por sua vez estão acima da média crustal, e se enriquecem também de forma absoluta na crosta ferroaluminosa, acompanhando o Fe. Da mesma forma, V, Cr, Mo, Hg, Bi e (Sb) (Figura 31), embora iniciem com valores abaixo da Crosta Terrestre (Wedepohl, 1995), também se enriquecem e acompanham igualmente Fe. Portanto, V, Cr, Co, Mo, W, Ni, Cu, As, Sb, Bi, Hg e Se formam uma possível associação geoquímica ancorada pelo Fe, tornando-se crescentes perfil acima, com máximo na crosta ferroaluminosa fosfática. Esta associação é encontrada na maioria dos perfis lateríticos fosfáticos ou não, a exemplo dos lateritos fosfáticos da região do Gurupi e das bauxitas de Paragominas e Juruti (Cruz, 2011; Ktschoubey, 2005). Ga, Sn, Zr, Hf, Nb e Ta também experimentam elevação de teor fundamentalmente na crosta ferroaluminosa fosfática, em fator 1,3 a 4, equivalente ao do Al e Ti; apenas Zr e Hf encontram-se com valores acima da média crustal. Assim Al, Ti, Ga, Sn, Zr, Hf, Nb e Ta devem constituir uma segunda associação geoquímica, também com os valores mais altos na crosta ferroaluminosa fosfática, exceto Al,

produzindo um comportamento tipicamente residual, em que zircão responderia por Zr, Hf, Nb e Ta, e em parte aos ETR; Ti ao anatásio e Al (Ga) receptor dos fosfatos.

Y, Sc, Ba, ETRL e ETRP se apresentam ligeiramente acima da média crustal (exceto Sc e Ba) já no horizonte argiloso e se enriquecem também de forma absoluta (fator 4 a 6), com maior intensidade na crosta ferroaluminosa fosfática (Figuras 31 e 32, Tabela 4), exceto para ETRL (La, Ce e Pr) que se equivalem nos dois tipos de crostas. Estes se correlacionam apenas parcialmente com P, S, Na, Ca e Sr, que apresentam fatores de concentração muito mais elevados (>10). Portanto P, S, Na, Ca, Sr, Y, Sc, Ba, ETRL e ETRP formam uma terceira associação, com maiores valores na crosta fosfática (P, S, Na, Ca, Sr, Y, La, Ce, Pr) ou na crosta ferroaluminosa (Sc, Y, Nd, Sm, Eu, ETRP) (Figura 32) igualmente encontrada nos perfis lateríticos fosfáticos da região do Gurupi. Esses dados sugerem que a formação gorceixita, mesmo que em níveis muito baixo favorece a concentração de ETR, em especial ETRP, teoricamente gorceixita-florencita, na crosta ferroaluminosa fosfática.

Rb e Cs são os únicos elementos traço analisados em que os seus teores diminuem ao longo do perfil laterítico da base para topo, em nítida relação com a eliminação da muscovita, e se confrontados com os elementos maiores os seus padrões se equivalem aos de SiO₂, MgO, K₂O, equivalente a associação Si-Mg-K-Rb-Cs, típica de evolução laterítica (Figura 32). Pb não apresentou comportamento similar aos demais elementos e seus teores estão muito abaixo da média da crosta terrestre e no perfil se concentram predominantemente no material detrítico.

Ao se comparar as concentrações dos elementos traço do material detrítico (CD) com a crosta ferroaluminosa fosfática e a crosta fosfática, também é evidente que o mesmo é uma mistura física destes horizontes, diluída com material externo, como demonstrado pela composição química representada pelos elementos maiores e menores, e seus teores sugerem que a contribuição maior foi da crosta fosfática. Os valores elevados desproporcionais de Zr, Hf, Nb, Ta, Rb, Sn W, Pb reforçam a incorporação de material externo ao perfil, como as coberturas sedimentares, ricas em quartzo (diluindo Ga e U) e ainda caulinita, muscovita (aumentando Rb, Cs e Sn) e o acessório zircão (aumentando Zr, Hf, Nb, Ta e Pb).

Tabela 4 – Concentrações (médias) dos elementos químicos maiores, menores e traços de amostras representativas dos horizontes do perfil laterítico fosfático de Sapucaia confrontadas com a composição química média da crosta superior da Terra. Legenda: M.C.: Média Crustal segundo Wedepohl, 1995; CD: Cobertura Detrítica; CFF: Crosta Ferroaluminosa Fosfática; CF: Crosta Fosfática; SC: Saprólito Caulinítico; F.E.: Fator de Enriquecimento em relação ao Saprólito. F.E.<1: Lixiviação; 1<F.E.>4: Concentração Relativa; F.E.>4: Concentração Absoluta.

Elemento %	M.C.	CD (n=7)				CFF (n=3)				CF (n=27)				SC (n=6)		
		Média	Min	Máx	F.E.	Média	Min	Máx	F.E.	Média	Min	Máx	F.E.	Média	Min	Max
SiO ₂	61,50	40,39	9,00	76,85	0,65	7,10	3,33	12,42	0,11	12,07	1,49	29,59	0,19	61,96	44,64	77,49
Al ₂ O ₃	15,20	19,91	12,68	26,35	0,88	24,30	22,93	25,25	1,07	30,47	24,54	34,44	1,34	22,71	9,89	34,99
Fe ₂ O ₃	6,28	4,97	0,94	8,91	1,81	19,87	19,13	21,20	7,23	1,89	0,66	4,54	0,69	2,75	1,24	7,59
MgO	3,70	0,08	0,06	0,10	0,92	0,06	0,05	0,07	0,71	0,06	0,02	0,12	0,68	0,09	0,04	0,17
CaO	5,50	3,87	0,49	6,86	13,82	5,88	5,31	6,67	21,00	6,90	2,58	9,86	24,64	0,28	0,03	0,44
Na ₂ O	3,30	0,05	0,00	0,08	4,86	0,05	0,03	0,06	4,67	0,42	0,03	3,31	42,07	0,01	0,00	0,03
K ₂ O	2,40	0,08	0,03	0,17	0,33	0,07	0,04	0,11	0,27	0,09	0,00	0,39	0,37	0,25	0,08	0,76
TiO ₂	0,68	1,12	0,64	1,51	1,41	1,67	1,55	1,86	2,09	0,85	0,17	2,50	1,06	0,80	0,38	1,11
P ₂ O ₅	0,18	13,28	1,71	23,47	11,55	19,14	18,10	19,91	16,64	23,89	15,90	27,74	20,77	1,15	0,10	2,59
MnO	0,01	0,00	0,00	0,01	0,86	0,04	0,00	0,10	7,33	0,01	0,00	0,03	1,48	0,01	0,00	0,02
SrO	0,03	3,02	0,38	5,58	11,21	3,99	3,71	4,42	14,81	5,04	2,33	5,91	18,68	0,27	0,00	0,00
SO ₃	0,034*	1,10	0,17	2,87	8,25	2,09	1,62	2,57	15,69	2,96	0,60	5,86	22,21	0,13	0,00	0,42
P.F.	-	12,97	6,00	19,20	1,36	17,50	16,10	18,70	1,83	17,60	14,30	20,30	1,84	9,57	5,60	13,90
Sc	16,00	17,71	9,00	26,00	2,01	44,00	25,00	59,00	4,98	18,00	5,00	47,00	2,04	8,83	4,00	15,00
Be	-	3,00	0,00	7,00	2,00	1,00	188,00	3,00	0,67	1,70	0,00	28,00	1,14	1,50	0,00	4,00
V	98,00	117,57	78,00	165,00	2,12	214,33	188,00	252,00	3,87	117,22	53,00	203,00	2,12	55,33	26,00	120,00
Cr	126,00	155,16	87,85	231,59	2,38	335,41	215,62	463,18	5,14	110,62	31,94	335,41	1,70	65,22	31,94	119,79
Co	24,00	1,33	0,70	2,90	0,75	2,97	0,90	6,60	1,68	0,66	0,00	1,40	0,38	1,77	0,70	3,70
Ni	56,00	1,31	0,10	2,80	4,93	3,80	0,60	8,40	14,25	0,46	0,00	8,40	1,72	0,27	0,00	1,10
Cu	25,00	1,33	1,80	13,90	1,00	14,67	2,00	31,40	11,00	4,19	0,40	51,20	3,14	1,33	0,20	3,90
Zn	0,07	170,57	37,00	425,00	13,29	142,00	90,00	192,00	11,06	60,74	5,00	123,00	4,73	12,83	2,00	36,00
Ga	65,00	34,53	17,50	45,10	1,60	58,70	42,70	74,90	2,73	37,09	21,40	78,20	1,72	21,53	12,10	28,90
As	2,00	4,50	0,60	10,90	1,59	12,20	5,70	21,30	4,31	1,94	0,00	8,20	0,68	2,83	0,00	12,10
Se	-	0,66	0,00	2,10	3,94	1,07	0,00	3,20	6,40	0,35	0,00	1,80	2,09	0,17	0,00	1,00
Rb	78,00	3,07	0,40	9,00	0,34	1,20	0,60	2,10	0,13	1,96	0,20	12,30	0,22	9,08	3,70	26,40
Y	24,00	78,46	53,80	117,90	2,05	214,47	99,80	252,00	5,62	66,41	5,90	132,40	1,74	38,18	7,30	91,00
Zr	203,00	556,47	389,10	844,10	1,11	583,67	461,40	647,40	1,16	231,83	26,80	656,40	0,46	502,13	222,40	913,80
Nb	19,00	29,31	17,10	38,80	2,46	45,33	38,90	52,80	3,80	13,26	3,10	38,40	1,11	11,92	5,90	16,30
Mo	1,10	0,71	0,00	1,60	3,57	1,73	1,40	2,10	8,67	0,59	0,00	4,30	2,94	0,20	0,00	0,90
Sn	2,00	2,86	2,00	4,00	2,45	5,00	4,00	6,00	4,29	1,41	0,00	4,00	1,21	1,17	0,00	3,00
Sb	0,30	0,06	0,00	0,10	0,00	0,43	0,30	0,70	0,00	0,14	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Cs	3,40	0,46	0,00	0,80	1,19	0,07	0,00	0,20	0,17	0,06	0,00	0,30	0,14	0,38	0,00	0,70

Tabela 4 – Concentrações (médias) dos elementos químicos maiores, menores e traços de amostras representativas dos horizontes do perfil laterítico fosfático de Sapucaia confrontadas com a composição química média da crosta superior da Terra. Legenda: M.C.: Média Crustal segundo Wedepohl, 1995; CD: Cobertura Detrítica; CFF: Crosta Ferroaluminosa Fosfática; CF: Crosta Fosfática; SC: Saprólito Caulinítico; F.E.: Fator de Enriquecimento em relação ao Saprólito. F.E.<1: Lixiviação; 1<F.E.>4: Concentração Relativa; F.E.>4: Concentração Absoluta. (Continuação).

Elemento %	M.C.	CD (n=7)				CFF (n=3)				CF (n=27)				SC (n=6)		
		Média	Min	Máx	F.E.	Média	Min	Máx	F.E.	Média	Min	Máx	F.E.	Média	Min	Max
Ba	584,00	581,57	323,00	770,00	2,24	757,33	603,00	930,00	2,91	506,37	178,00	1019,00	1,95	260,00	82,00	484,00
Hf	4,90	14,40	9,20	22,50	1,12	15,00	10,90	17,50	1,17	6,47	0,00	18,70	0,50	12,85	6,30	21,70
Ta	1,10	2,33	1,50	3,60	2,29	2,83	2,50	3,20	2,79	0,86	0,00	2,50	0,84	1,02	0,50	1,40
W	1,00	6,56	2,60	18,80	2,31	13,57	2,70	29,50	4,79	1,17	0,00	4,80	0,41	2,83	0,00	7,20
Au	2,50	1,46	0,00	6,00	1,62	0,00	0,00	0,00	0,00	1,92	0,00	10,70	2,14	0,90	0,00	2,80
Hg	0,04	0,19	0,05	0,33	14,04	0,36	0,08	0,60	26,75	0,04	0,00	0,21	2,78	0,01	0,00	0,06
Pb	14,80	5,40	1,40	8,20	1,67	3,30	2,30	4,10	1,02	1,61	0,20	3,80	0,50	3,23	0,20	9,90
Bi	0,12	0,13	0,00	0,20	3,86	0,33	0,20	0,50	10,00	0,05	0,00	0,30	1,56	0,03	0,00	0,20
Th	8,50	17,90	10,90	21,70	1,74	28,03	22,30	33,20	2,72	14,08	4,70	34,10	1,36	10,32	6,10	13,40
U	1,70	16,89	10,90	25,70	4,56	25,73	19,10	30,60	6,95	18,09	5,00	61,80	4,89	3,70	1,50	6,90
La	32,30	57,90	45,50	72,30	1,59	52,53	26,20	84,60	1,44	58,69	12,80	154,40	1,61	36,52	12,00	63,00
Ce	67,70	131,03	94,80	178,10	1,75	113,97	48,50	211,90	1,52	115,13	18,70	298,40	1,53	75,08	18,70	121,30
Pr	1,60	15,81	10,94	19,58	2,01	13,91	5,79	25,17	1,77	12,78	2,00	33,77	1,62	7,88	1,72	13,81
Nd	25,90	65,01	43,50	90,90	2,21	57,87	25,10	97,80	1,96	47,58	7,10	127,70	1,62	29,45	3,70	55,70
Sm	4,70	14,08	8,79	24,56	2,46	13,79	7,49	20,60	2,41	8,59	1,34	27,26	1,50	5,72	0,83	11,21
Eu	0,95	3,30	1,93	6,25	2,62	3,67	2,40	4,75	2,91	2,07	0,41	6,46	1,64	1,26	0,27	2,35
Gd	2,80	14,75	8,24	26,55	2,67	20,62	16,13	25,92	3,74	7,33	1,49	26,91	1,33	5,52	0,72	12,17
Tb	0,50	2,43	1,38	3,79	2,69	4,29	2,88	6,46	4,76	1,16	0,27	4,18	1,28	0,90	0,12	1,96
Dy	2,90	14,29	8,79	23,87	2,49	30,51	19,04	51,43	5,31	7,19	1,41	21,80	1,25	5,75	0,72	12,81
Ho	0,62	3,05	1,80	5,09	2,22	7,88	4,08	14,66	5,72	2,02	0,32	5,08	1,46	1,38	0,21	3,30
Er	0,95	8,14	4,80	12,61	2,18	21,64	11,38	40,62	5,80	6,89	1,34	14,91	1,85	3,73	0,75	8,04
Tm	-	1,19	0,80	1,75	2,08	2,80	1,56	5,03	4,90	1,11	0,35	2,08	1,94	0,57	0,12	1,44
Yb	1,50	6,90	4,93	9,31	1,97	14,70	8,73	25,09	4,21	6,81	2,77	11,40	1,95	3,50	0,96	8,37
Lu	0,27	0,92	0,65	1,25	1,97	1,81	1,22	2,95	3,86	0,94	0,38	1,50	2,01	0,47	0,19	0,91
LREE	133,15	287,14	205,92	368,34	1,84	255,74	115,48	444,82	1,64	244,84	42,35	642,14	1,57	155,91	37,82	259,37
HREE	9,54	51,67	32,26	77,00	2,37	104,26	65,02	172,16	4,78	33,44	8,71	79,20	1,53	21,81	3,80	44,75
REE	142,69	338,81	240,53	445,34	1,91	360,00	180,50	520,43	2,03	278,28	57,56	695,17	1,57	177,72	41,62	302,95
(La/Eu)n	8,06	2,84	1,35	4,00	0,52	2,34	2,20	2,59	0,43	5,05	2,48	7,41	0,92	5,46	3,03	9,10
(Gd/Lu)n	1,28	1,99	1,22	3,59	1,38	1,56	1,09	1,94	1,08	0,95	0,23	2,95	0,66	1,45	0,32	2,85
(La/Lu)n	12,41	6,59	5,46	7,49	0,66	3,60	1,65	6,91	0,36	6,70	2,04	16,25	0,67	10,00	19,23	19,23
Eu/Eu*	2,38	0,69	0,65	0,74	0,89	0,66	0,62	0,71	0,86	0,80	0,68	1,00	1,04	0,77	0,60	1,04

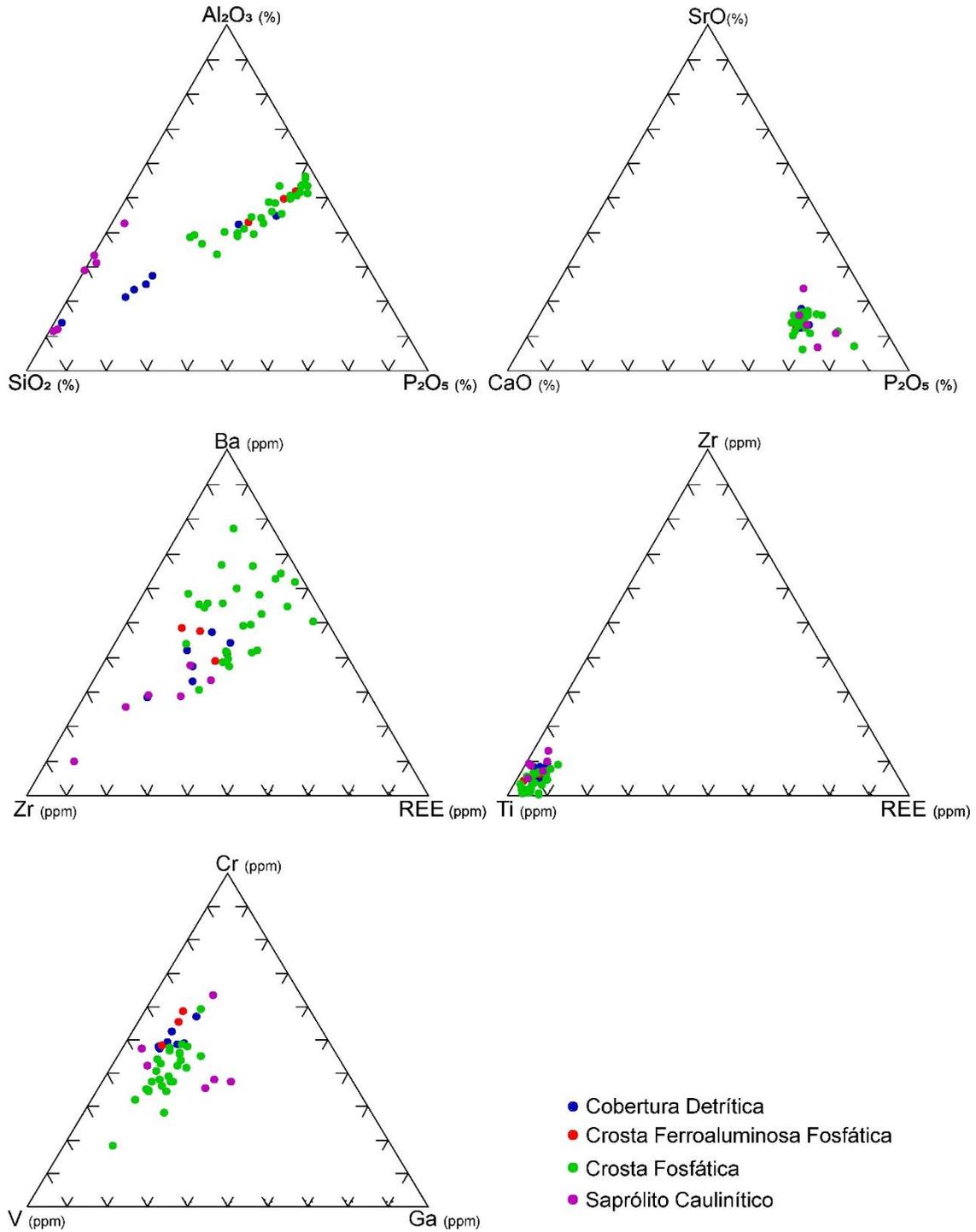


Figura 30 – Diagramas ternários SiO_2 - Al_2O_3 - P_2O_5 , CaO - SrO - P_2O_5 , Zr - Ba - REE , Ti - Zr - REE e V - Cr - Ga para amostras do perfil laterítico de Sapucaia, segundo horizontes lateríticos definidos.

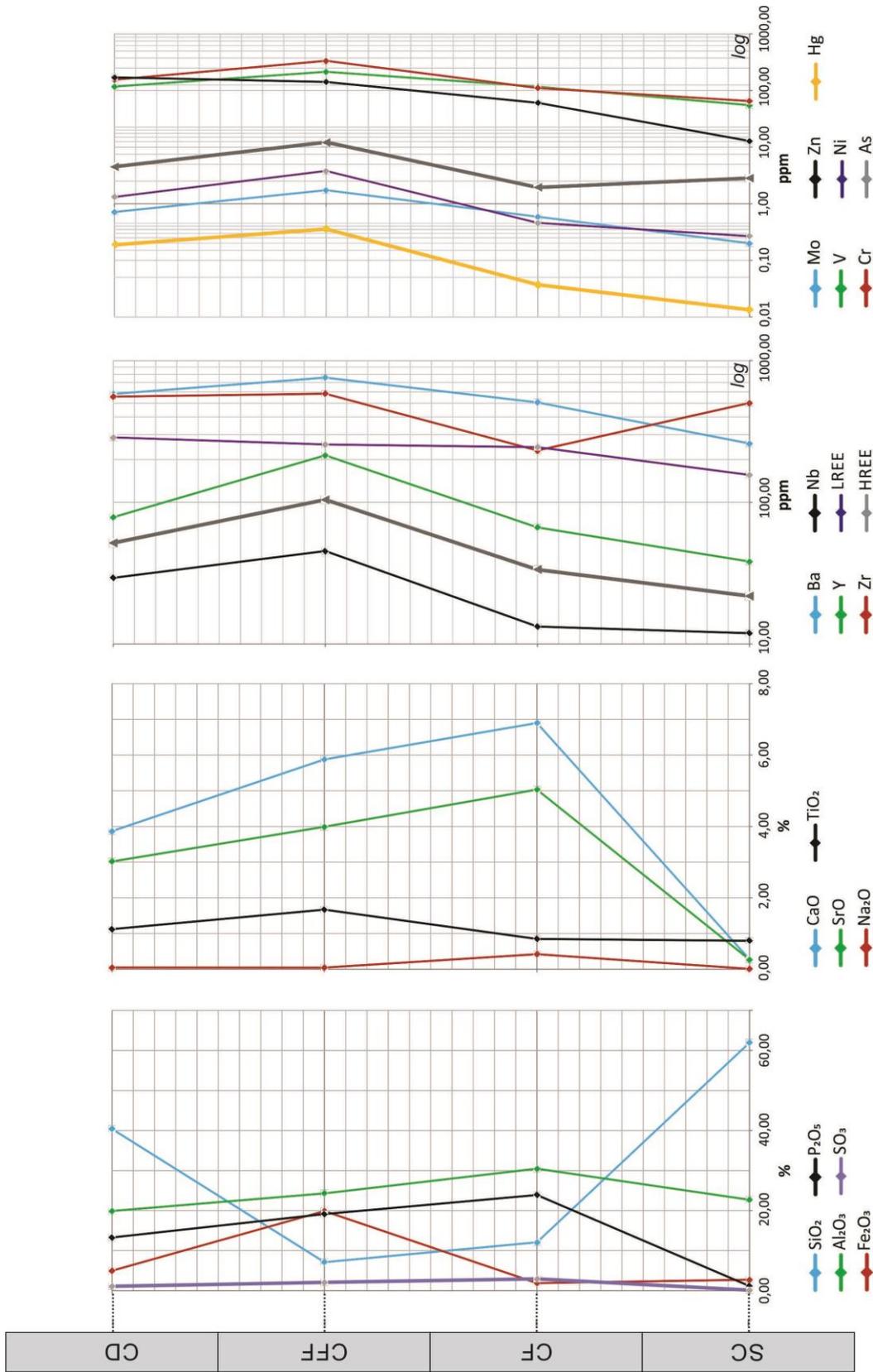


Figura 31 – Distribuição das concentrações (médias) de elementos maiores, menores e traços no perfil laterítico e sua cobertura detrítica mineralizada do Morro Sapucaia.

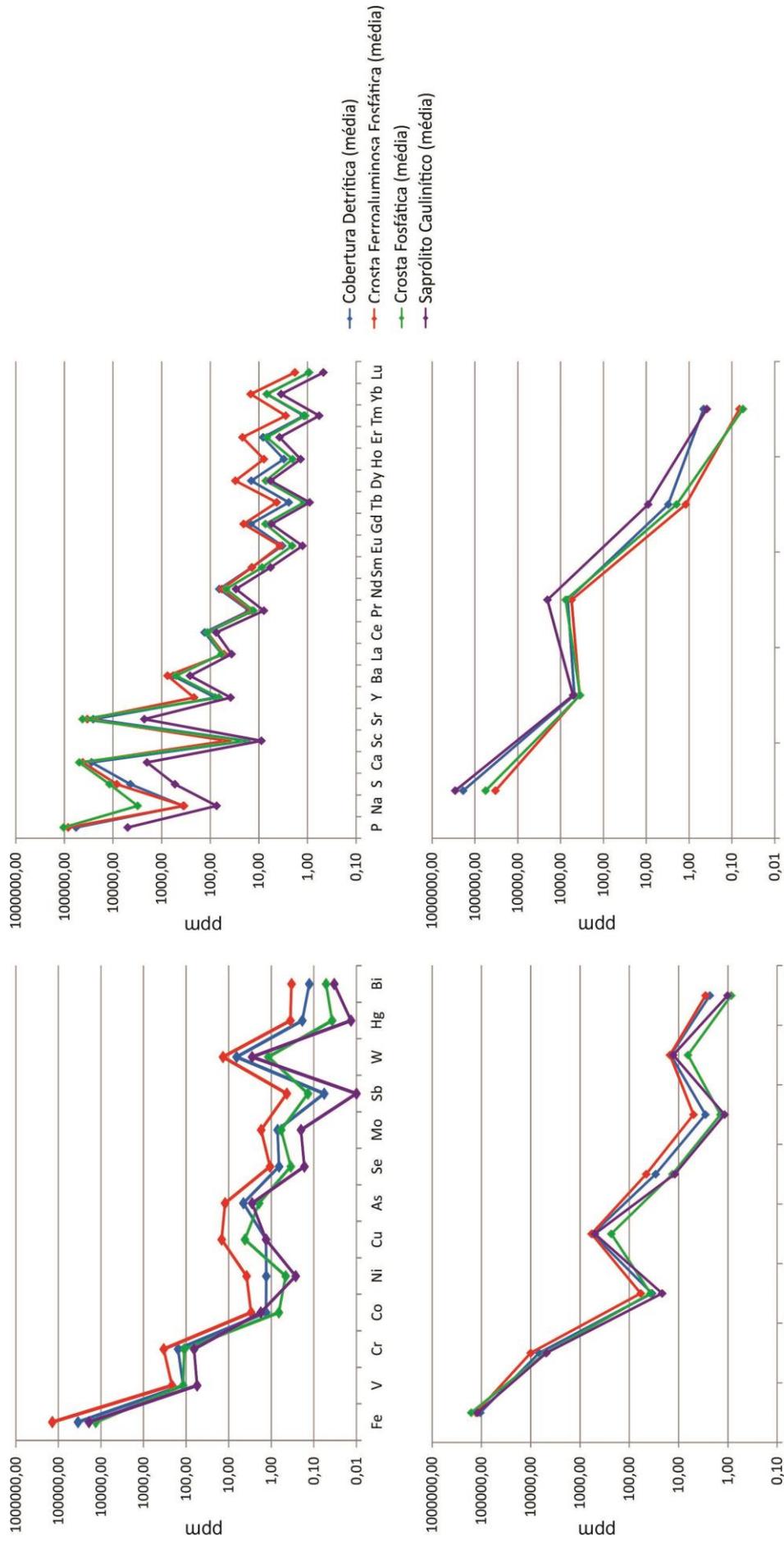


Figura 32 - Distribuição comparativa entre as concentrações dos elementos químicos (ppm) segundo cada associação geoquímica para cada horizonte do perfil e sua cobertura (associações inferidas a partir dessas concentrações). Os elementos maiores e menores estão representados em seus respectivos óxidos: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, SrO, MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂, P₂O₅ e SO₃.

As análises de agrupamento (single linkage and Pearson r) para todo o conjunto de amostras do perfil laterítico (Figura 38) permitiu melhor caracterizar as associações identificadas através da análise simples dos teores dos elementos, porém não se distanciando expressivamente destas, e se destacaram:

- 1) Fe-As-W-(Sn-Ga-Ta-Nb-Cr-Th-Ti-Hg)-(Zr-Hf-V-Sc)-(ETRL-(Eu)-ETRP) (decrecente *linkage distance*)
 - a) Ba-Mn-Bi-Se-Pb-Co-Na-Ni-Mo-Sb-U (maior *linkage distance*)
 - b) Si-K-Rb-(*linkage distance* baixa)-Cu

- 2) Al-Ca-Sr-P-S-H₂O (*linkage distance* baixa)

- 3) Mg-Na-Au-Be (*linkage distance* muito alta), não constitui associação.

As distâncias de ligação (*linkage distances*) confirmam assim a maior identidade dos ETR com a associação do Fe, que inclui entre outros elementos, Ti e Zr que formam os principais minerais acessórios, anatásio e zircão, respectivamente. A matriz de correlação (figura 33) suporta essa assertiva e os diagramas de dispersão permitem visualizar as melhores correlações de Pearson de pares de elementos das principais associações (Figuras 34 a 37).

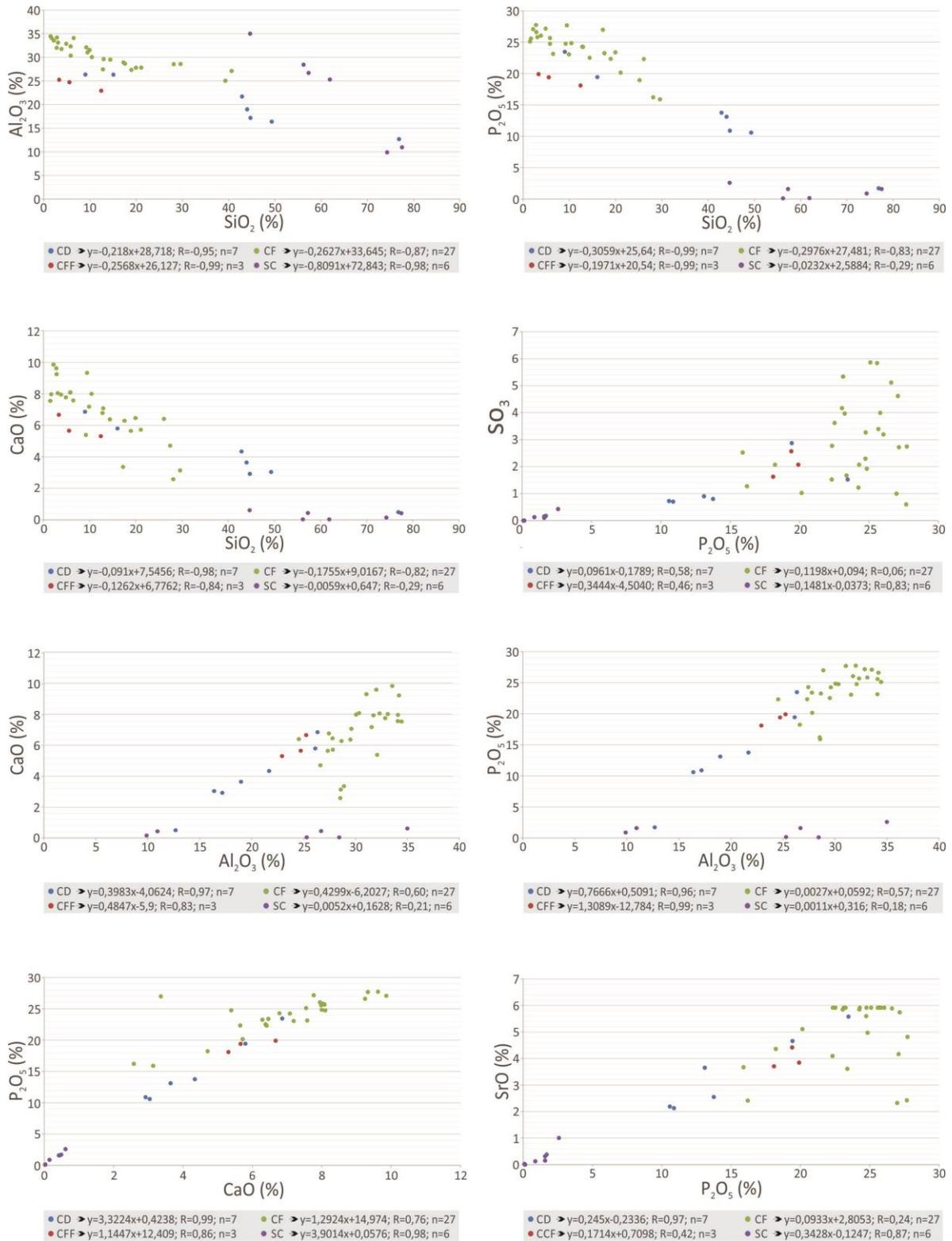


Figura 34 – Diagramas de dispersão para pares de elementos químicos indicativos de evolução laterítica (SiO_2 - Al_2O_3 e SiO_2 - P_2O_5 negativo) e típicas de fosfatos de alumínio tipo crandallita-goyazita e woodhouseita-svanbergita (P_2O_5 - CaO , P_2O_5 - SO_3 , P_2O_5 - SrO , CaO - SrO , SrO - Ba positivas), cuja tendência a linearidade, independente dos horizontes, sugere formarem mesma fase e/ou solução sólida constante.

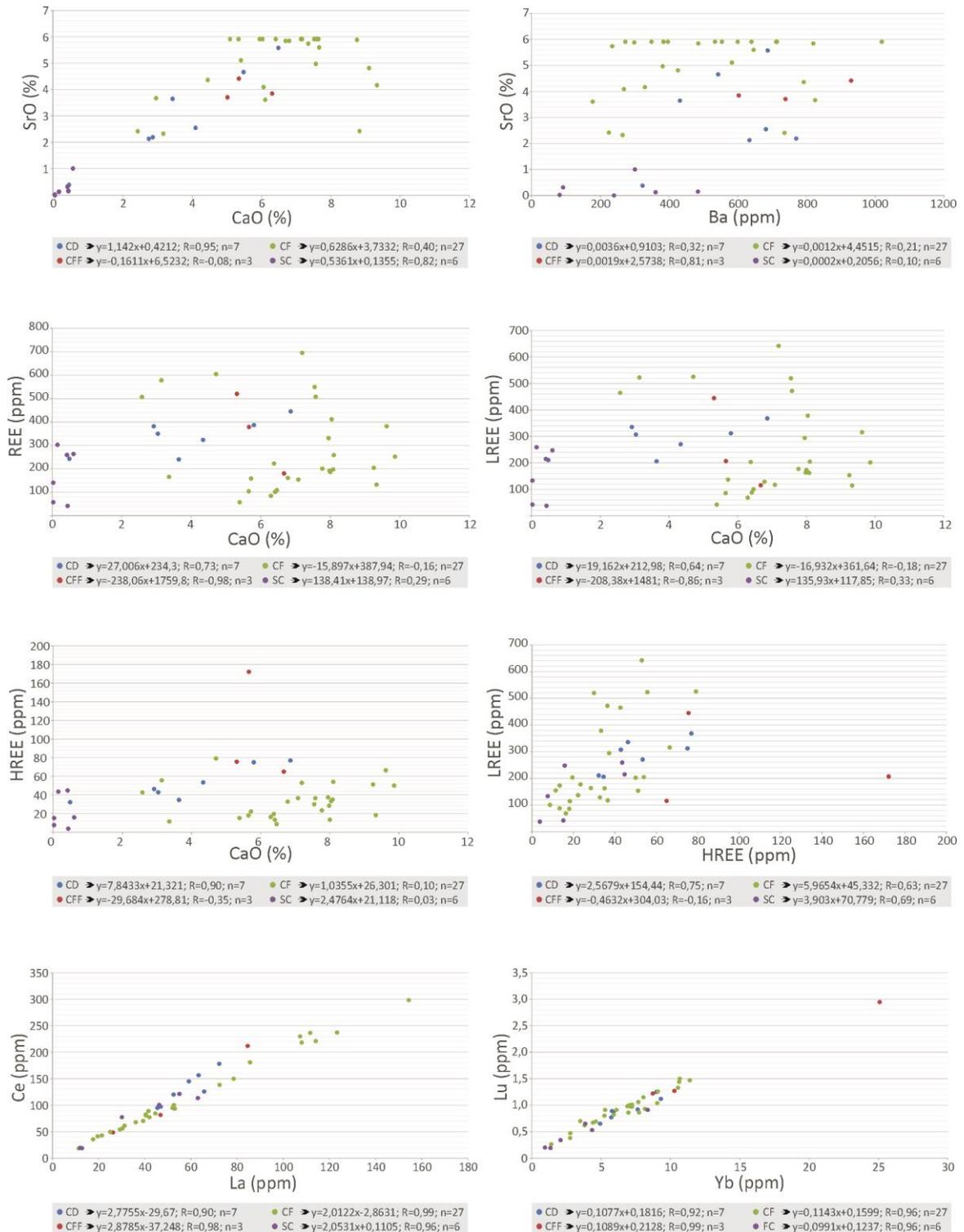


Figura 35 – Diagramas de dispersão para pares de elementos químicos cujas concentrações aumentam em direção às crostas fosfáticas. Os ETR mostram tendência positiva com Ca, Sr, Ba, mas a grande dispersão sugere que estes elementos façam parte de outras fases minerais. Ce-La e Lu-Yb são os únicos ETR que preservam a forte relação entre si independente dos materiais do perfil e cobertura, indicando forte assinatura a uma única fase mineral, provavelmente zircão.

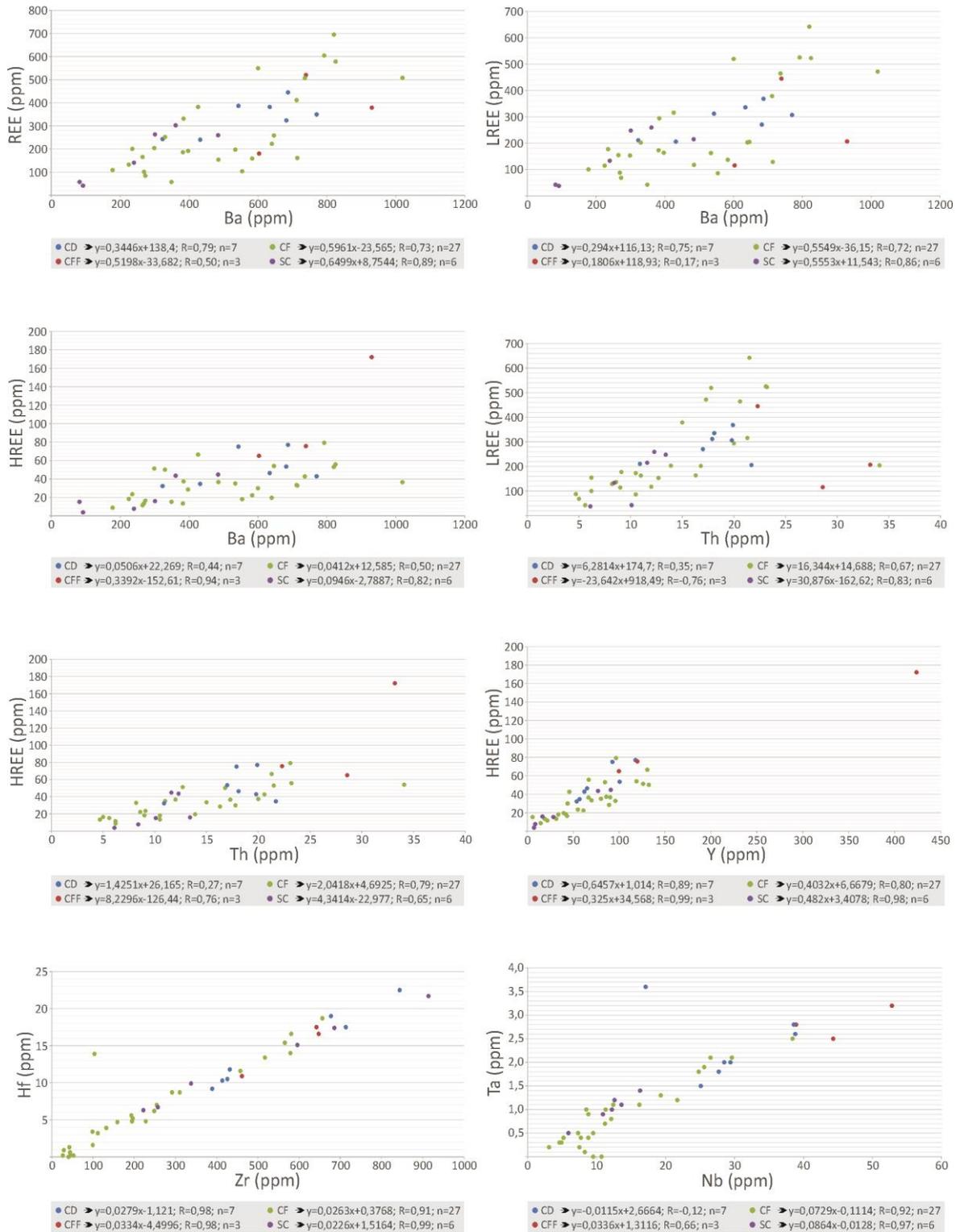


Figura 36 – Diagramas de dispersão de pares de elementos com forte correlação positiva, que se enriquecem no perfil laterítico do depósito de fosfatos do Morro Sapucaia. A pequena dispersão entre Zr-Hf e Nb-Ta, aproximando da linearidade sugere que esses elementos constituem a única fase, o zircão, que deve provir de uma fonte única. Por outro lado os ETR mostram maior dispersão entre si e também como Ba, Y e Th, sugerindo que os mesmos se fracionam entre diferentes fases minerais: fosfatos e zircão.

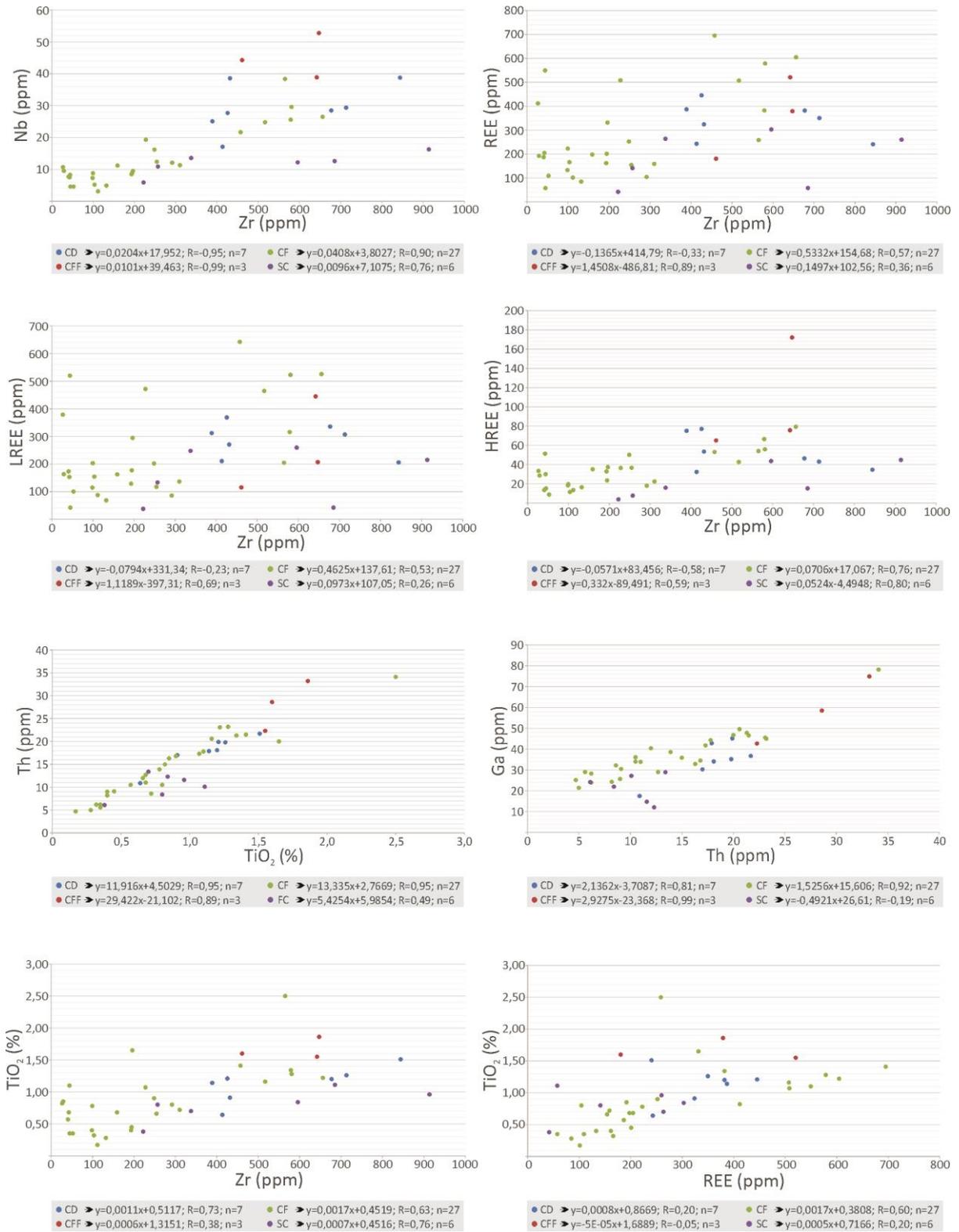


Figura 37 – Diagramas de dispersão de pares de elementos químicos, que se concentram nas crostas fosfáticas, suportando a forte afinidade entre Ti, Zr, Th e Ga e muito menos profícua com ETR, com os quais tendem a formar dois domínios.

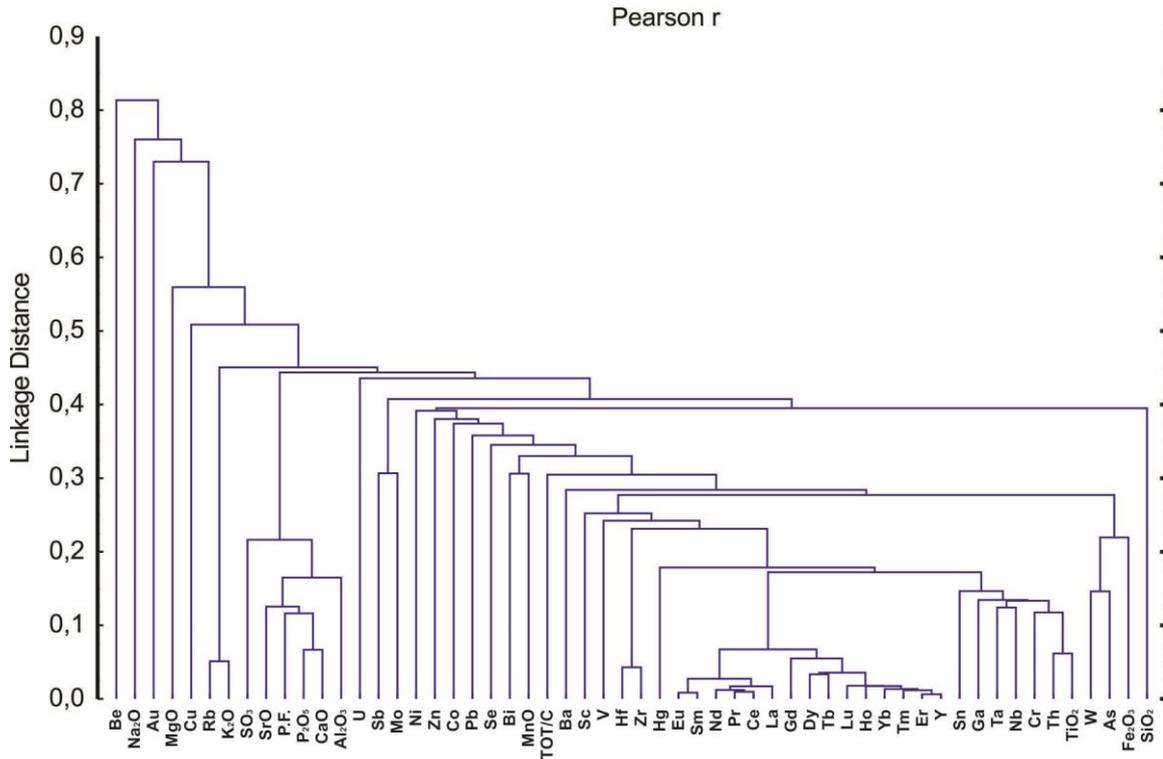


Figura 38 – Dendrograma segundo todas as amostras do perfil laterítico incluindo a cobertura.

Considerando-se cada horizonte (Figura 39) constata-se:

6.4.1 Horizonte Argiloso

- 1) Si-Ba-Sn-Au-ETRL-ETRP-Zr-Hf-Pb-U-Y-Hg-Mo-As-Ni-Se-Fe (*linkage distance* baixa e decrescente);
- 2) (Ca-P-Sr-S-B-Sc-Cr-Ti-Nb-Ta)-Co-Be-Zn (*linkage distance* média, crescente)
 - a. Al-H₂O-Ga (*linkage distance* muito baixa)
 - b. Mg-Mn (*linkage distance* baixa)
 - c. K-Rb (*linkage distance* muito baixa)

Os ETR constituem claramente dois subgrupos e mostram a forte conexão com associação que contém Fe com *linkage distance* muito baixa. A associação do fósforo-enxofre representa classicamente a sua composição química e mineralógica crandallita-goyazita e woodhouseita-svanbergita. A correlação positiva P-S sugere que esses minerais de fato constituam uma única série mineral.

6.4.2 Crosta Fosfática

- 1) (ETRL)-(ETRP+Y)-(Ti-Th-Ga-Cr-Zr-Ta-Nb-Hf-Sn) (*linkage distance* muito baixa a baixa)
 - a. Sc-V-W-Ba (*linkage distance* média);
 - b. Fe-As-Mo-Sb-Mg-Sb-Zn-Hg-U (*linkage distance* alta)
- 2) Al-H₂O-S-Ca-P-Sr (*linkage distance* média)
 - a. K-Rb-Bi-Mn-Cu (*linkage distance* baixa a alta).
 - b. Si-Co-Na-Be-Se-Au (*linkage distance* muito alta), não considera-se associação.

Novamente os ETR constituem dois sub-domínios distintos com distância muito baixa, portanto alta relevância, com forte ligação com Ti e Zr, ou seja mais uma vez com os minerais destes elementos, anatásio e zircão, respectivamente. Portanto estes não são de fato atraídos pelos fosfatos no seu todo. A associação do Fe perde expressão, certamente expressando os seus baixos teores neste horizonte.

6.4.3 Crosta Ferroaluminosa Fosfática

- 1) (ETRP+Y)-(S-Ga-Cr-Al-Th-U)-(Sr-Ti-V)-(Hg-Pb-Mo-Ta-Ba-Gd-Sn) (muito baixa)
 - a. Si-As-Pr-W-Ce-Cu-K-La-Nd-Sm-Se-Sb (muito baixa a baixa)
 - b. Rb-Eu-Zr-Hf (baixa)
- 2) (Al-P-Sc)-(Fe-Co-Ni)-(Ca-Bi) (cada um dos sub-domínios baixa; conjunto em alta).

Na crosta ferroaluminosa fosfática os ETR se distanciam entre si, demonstrando forte afinidade com Zr (zircão) e especificamente ETRP com Y, direcionado aos sulfatos (woodhouseita-svanbergita).

6.4.4 Cobertura Detrítica

- 1) (Al-Ca-Sr-P-H₂O)-(ETRP+Y-Lu)-{ETRL-(Pr,Ce,La)}-Sc-Cr-Ga-S-U-Lu-V;
- 2) Fe-Pr-Ce-La-Se-Mo-Zn-Sn-W-As-Au-Ba-Hg-Cu-Na-Bi-Ti-Th-Sb-Mn-(Zr-Hf,baixa)-Nb-Ni-Mg (media a alta, crescente);
- 3) Si-Pb-Be-Ta-Co-Rb-K (media).

Na cobertura detrítica confirma-se claramente a mistura de materiais. Os ETRP +Y se isolam nitidamente e os ETRL (somente Sm, Nd e Gd) se esfacelam e se agrupam no domínio dos fosfatos e fosfatos-sulfatos, crandallita-goyazita e woodhouseita-svanbergita, respectivamente. Parte dos ETRL (La, Ce e Pr) se associam ao Fe, Ti, Zr, entre outros, portanto oxihidróxidos de Fe, anatásio e zircão, respectivamente. Si, K e Rb sugerem a incorporação física dos sedimentos Barreiras, como associado anteriormente.

Análises multivariadas apresentadas nos dendrogramas (Figura 40) mostram que os horizontes crosta fosfática e em parte crosta ferroaluminosa fosfática constituem de fato um grupo a parte, como demonstrado pela geologia e mineralogia, correspondendo a um subambiente muito específico dentro do perfil laterítico, com aporte e sequestro de elementos químicos muito móveis como P, S, Ca, Sr, Ba e em parte ETR, da mesma forma como o fazem Fe, Mo, Hg, V, As.

A composição química e associações geoquímicas do perfil laterítico do Morro Sapucaia distinguem-se dos perfis lateríticos não mineralizados em fósforo, pelos teores elevados e anômalos de P, S, Ca, Sr, Na, (Ba) e em parte ETR (estes com teores médios mais elevados do que os perfis lateríticos bauxíticos em geral). Com exceção dos ETR, esses elementos são classicamente lixiviados em perfis lateríticos, quando o substrato não se encontra mineralizado em P.

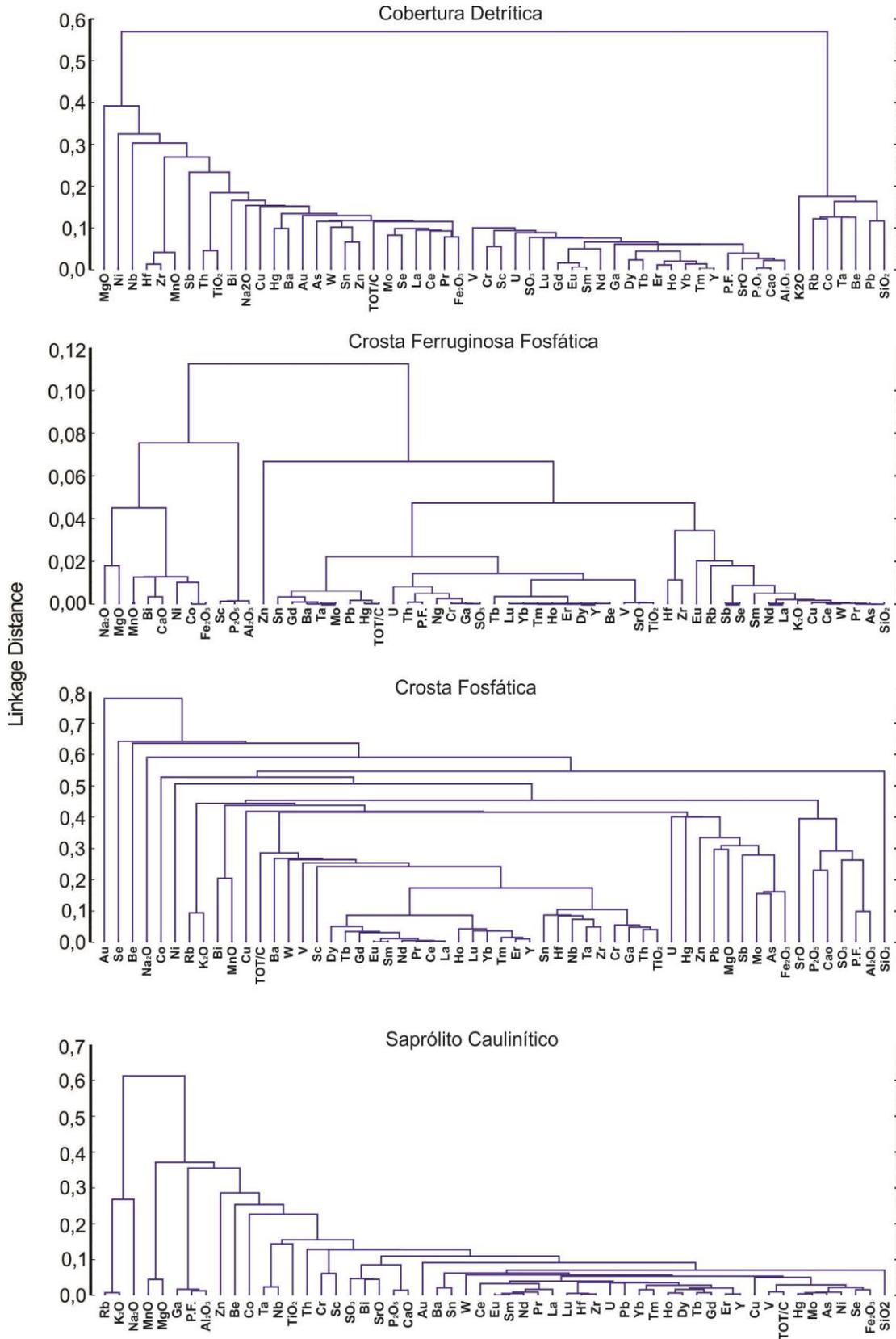


Figura 39 – Dendrogramas para os horizontes e cobertura do perfil laterítico do Morro Sapucaia.

6.4.5 Os Elementos Terra Raras

A somatória das concentrações dos ETR que nitidamente aumenta da base para o topo do perfil (Figura 41), atinge 360 ppm na crosta ferroaluminosa fosfática, valor este que é quase o triplo da média crustal. Enquanto os ETRL se concentram de forma gradual, os ETRP o fazem de forma brusca, demonstrando a separação marcante entre eles. Isto sugere que os ETRP + (Y, Sc) possuam maior afinidade com o domínio oxi-hidróxidos de Fe (hematita e/goethita), Ti (anatásio), de Ba (provável gorceixita) e Zr (zircão), que tem na crosta ferroaluminosa as suas maiores concentrações, enquanto os ETRL (somente La, Ce e Pr) teriam maior afinidade com os fosfatos crandallita-goyazita e woodhouseita-svanbergita, concentrados nas duas crostas.

Quando normalizados aos condritos, os teores médios por horizonte (inclui a cobertura detrítica) ou o conjunto de todas as amostras ou por horizonte deixam claro o enriquecimento para o topo do perfil laterítico, em que o dos ETRP é mais acentuado, e ainda desenvolve ligeira anomalia negativa de Eu (Figura 41).

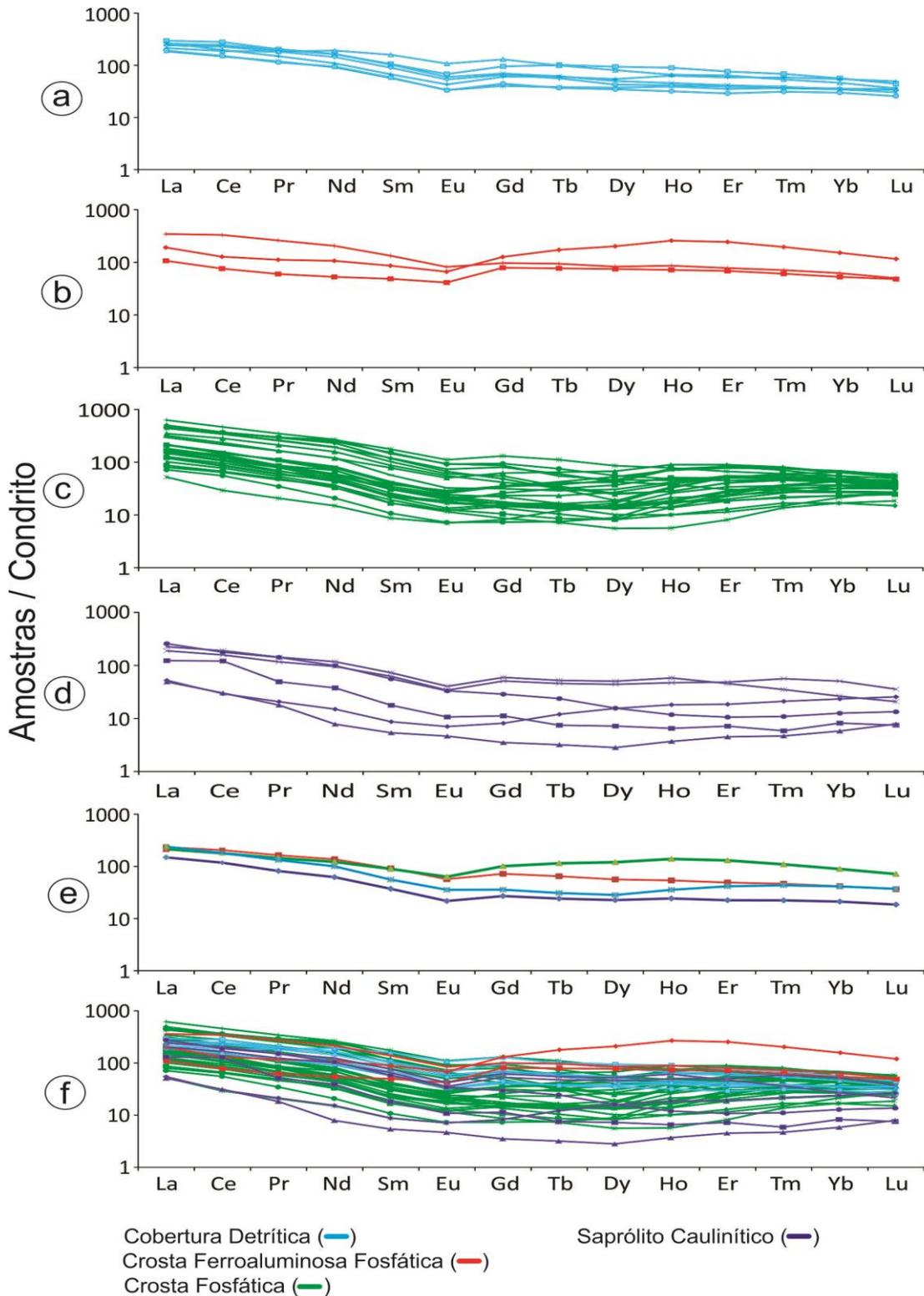


Figura 41 – Concentrações dos ETR no perfil laterítico do Morro Sapucaia normalizadas aos condritos (Evensen et al., 1978). a) Cobertura detrítica; b) Crosta ferroaluminosa fosfática; c) Crosta fosfática; d) Horizonte argiloso; e) Valores médios para cada horizonte; f) Todas as amostras do perfil laterítico.

7 DISCUSSÕES

A configuração do corpo mineralizado em fosfatos de alumínio do Morro Sapucaia, sob a forma de horizontes ou zonas, com um horizonte argiloso na base, sucedido por uma possante crosta de fosfatos de alumínio em contato gradacional a uma crosta ferroaluminosa fosfática, se equivale apenas aos depósitos de fosfatos de alumínio lateríticos da região Nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão, conhecida como região do Gurupi e descritos por Abreu, 1937; Argentiére, 1971; Brandt, 1932; Costa et al, 1978; Costa, 1980; Costa et al, 1980; Oliveira, 1980; Costa, 1982; Reymão, 1982; Siqueira, 1982; Costa, 1984; Costa & Costa, 1987; Costa, 1990; Costa & Costa, 1991; Gonçalves & Ktschoubey, 2001. Quanto a espessura, os dois horizontes mineralizados são correlacionáveis aos depósitos de Trauíra, Pirocaua, Cansa Perna e Itacupim. Quando a correlação é feita com base na fase mineral fosfática dominante, o depósito de Sapucaia encontra perfeita equivalência nos depósitos do morro Jandiá, Itacupim e Trauíra (Tabela 5). No morro Jandiá e em Trauíra a crosta ferro aluminosa fosfática foi no entanto parcialmente modificada por fosfatos verdes azulados de Fe-Ca, tipo mitridatita, dufrenita, beraunita e kingsmountita (Oliveira, 1980; Costa, 1982; Reymão, 1982). Vale ressaltar a presença marcante de muscovita em palhetas milimétricas a sub-milimétricas tanto em Jandiá quanto em Sapucaia, e a ocorrência de caulins também é um fator em comum em ambos os depósitos. Por conta do domínio de crandallita-goyazita, Sapucaia se distancia significativamente de Pirocaua e Cansa Perna, ricos em augelita e senegalita, respectivamente (Oliveira, 1980; Costa, 1982; Siqueira, 1982).

Em relação aos principais depósitos mundiais, no que concerne a crosta fosfática, Sapucaia se compara aos depósitos do Senegal (Lam-Lam e Thiès) descritos por Blanchard, 1972, Bonnot-Courtois & Flicoteaux, 1989, onde os fosfatos de alumínio se formaram a partir de camadas ricas em apatita e minerais de argila. Na região do Gurupi fosfatos primários como fonte dos fosfatos lateríticos foram até agora encontrados apenas no depósito de Itacupim.

Comparações geoquímicas, empregando-se os principais elementos constituintes dos minerais formadores dos fosfatos de alumínio, deixam claro que os fosfatos de Sapucaia encontram forte semelhança com aqueles de Jandiá (Figuras 42 e 43). Também em termos de elementos-traço essa semelhança se fortalece (Figura 44). Crandallita-Goyazita se apresenta como uma série mineral de ampla capacidade de diadoquia, de forma similar a apatita (Tabela 6), em que um compensa o outro quando na mudança de ambiência, onde apatita não é um mineral estável ao intemperismo, especialmente ao tropical. Essa capacidade diadóquica da crandallita é bem evidente nos fosfatos de Taiba e Senegal (Tabela 7), depósitos onde Ba, Cd, Co, Cr, Ga, Hg, Pb, Sc, Se, Sr, Sn, Ti, U, Y, Zr são considerados enriquecidos (Samb, 2000).

Tabela 5 – Correlações litológicas e mineralógicas básicas entre os depósitos de fosfatos de alumínio laterítico da região do Gurupi e aquele do Morro Sapucaia. (Costa, 1980; Toledo et al, 2006).

Horizonte	Depósito					
	Cansa Perna	Pirocaua	Trauíra	Jandiá	Itacupim	Sapucaia
Crosta Ferroaluminosa Fosfática	Hematita	Hematita	Hematita	Hematita	Hematita	Crandallita-goyazita
	Goethita	Goethita	Goethita	Crandallita-goyazita	Goethita	Woodhouseíta-svanbergita
	Senegalita	Augelita	Variscita	Wardita	Crandallita-goyazita	Wardita-millisitita
	Variscita	Crandallita-goyazita	Fe-Variscita	Variscita-strengita	Wardita	Goethita
	Caulinita	Senegalita	Dufrenita	Wavellita	Gibbsita	Hematita
		Wavellita	Mitridatita	Mitridatita		Quartzo
		Beraunita	Beraunita	Dufrenita		Anatásio
		Dufrenita	Crandallita	Beraunita		
		Dravita		Kingsmontita		
				Quartzo		
Crosta Fosfática	Senegalita	Augelita	Variscita	Crandallita-goyazita	Crandallita-goyazita	Crandallita-goyazita
	Variscita	Crandallita-goyazita	Wardita	Wardita	Wardita	Woodhouseíta-svanbergita
	Crandallita-goyazita	Goethita	Crandallita-goyazita	Variscita-strengita	Gibbsita	Wardita-millisitita
	Augelita	Hematita	Goethita	Mitridatita	Goethita	Goethita
	Wavellita	Gibbsita	Dufrenita	Dufrenita	Hematita	Hematita
	Wardita	Boehmita	Gibbsita	Goethita	Quartzo	Caulinita
	Goethita	Dravita		Caulinita	Quartzo	Quartzo
	Hematita	Variscita-strengita		Quartzo		Anatásio
	Anatásio					

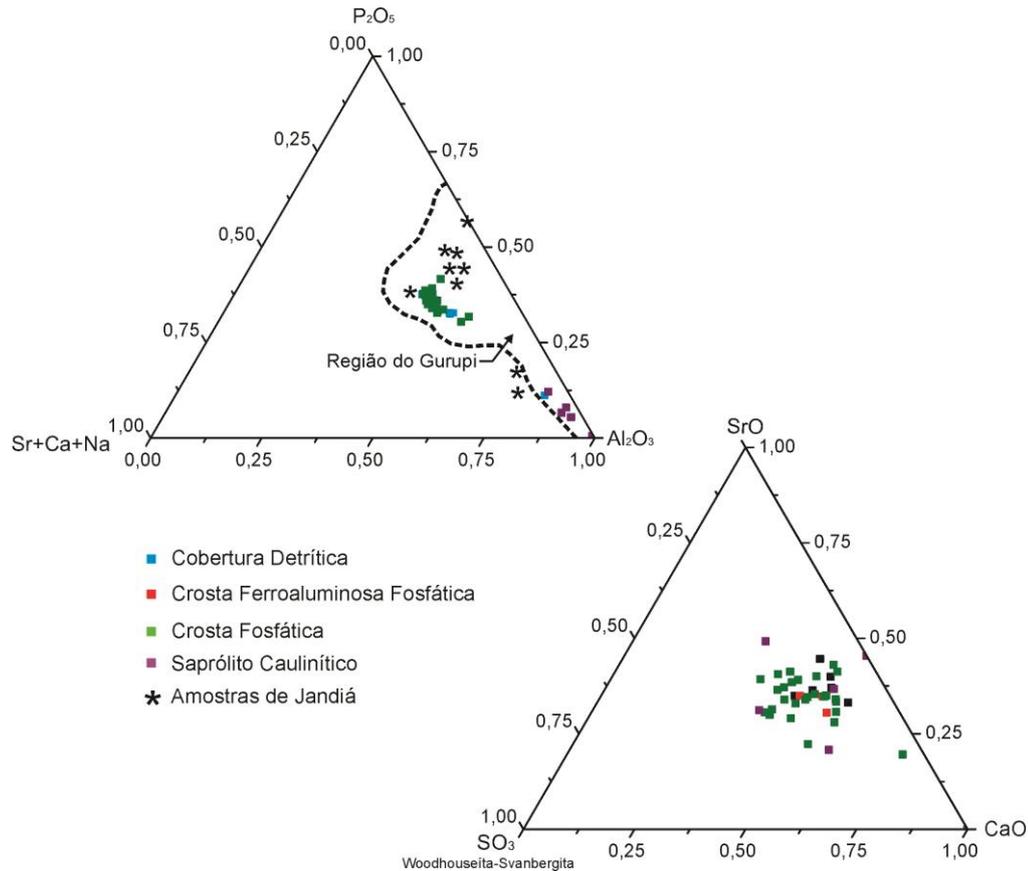


Figura 42 – Diagrama ternário para as concentrações $(\text{Sr}+\text{Ca}+\text{Na})\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3$ e $\text{SrO-SO}_3\text{-CaO}$ para amostras do perfil de Sapucaia agrupadas segundo horizontes lateríticos definidos. Resultados analíticos de amostras de Jandiá (*) em Costa, 1990.

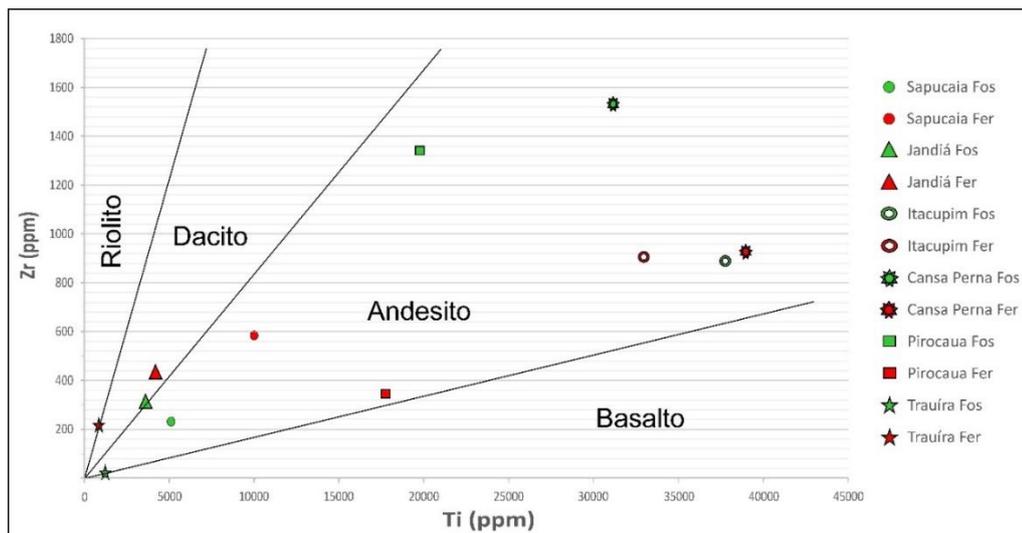


Figura 43 – Razões Ti/Zr para amostras dos principais depósitos lateríticos do Gurupi. (Hallberg, 1984), que denotam a possível similaridade das rochas fontes para os depósitos de Jandiá e Sapucaia. Dados obtidos por Costa, 1990 (Jandiá); Toledo et al, 2006 (Itacupim); Costa, 1980 (Cansa Perna); Costa & Araújo, 1996 (Pirocaua e Trauíra).

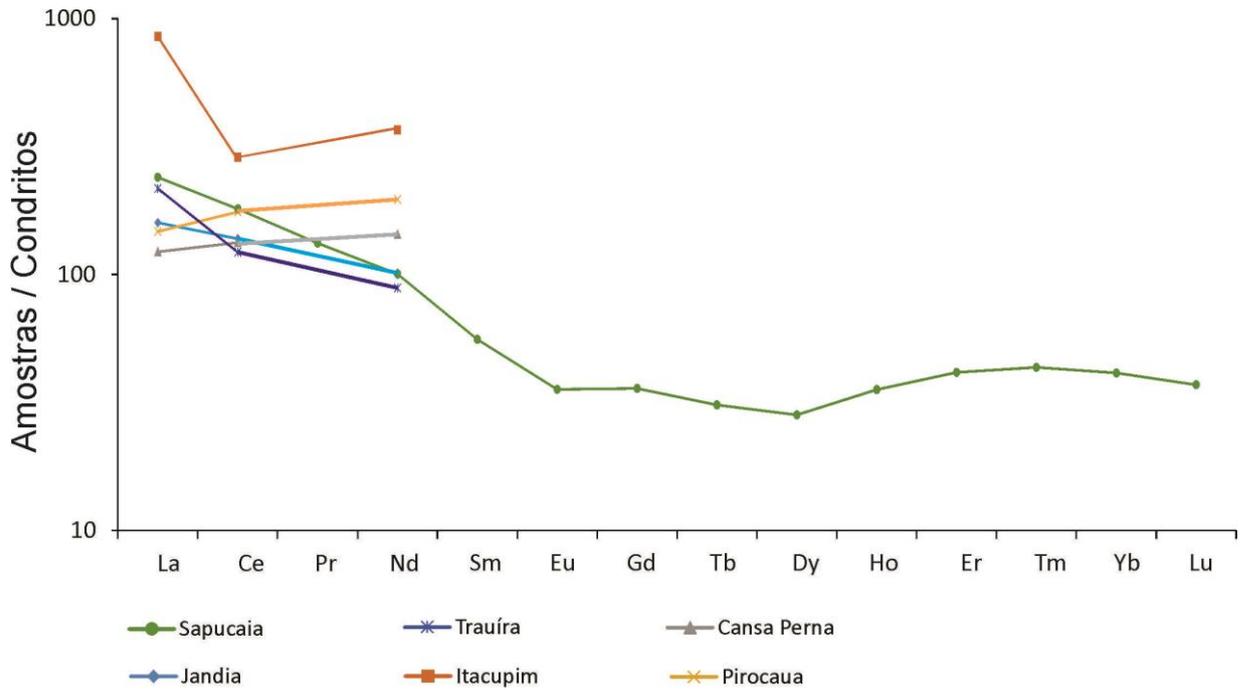


Figura 44 – Comparações geoquímicas entre crostas fosfáticas dos depósitos de fosfatos lateríticos da região do Gurupi. Dados geoquímicos obtidos por Costa, 1990 (Jandiá); Toledo et al, 2006 (Itacupim); Costa, 1980 (Cansa Perna e Pirocaua); Oliveira, 1980 (Trauíra).

Tabela 6 – Substituições iônicas no grupo da apatita e no grupo da crandalita (Nathan, 1984; Costa & Costa, 1987).

Íon Constituinte	Íon Substituinte
APATITA	
Ca ²⁺	Na ⁺ K ⁺ Ag ⁺ / Sr ²⁺ Mn ²⁺ Mg ²⁺ Zn ²⁺ Cd ²⁺ Ba ²⁺ / Sc ³⁺ Y ³⁺ TR ³⁺ Bi ³⁺ / U ⁴⁺
PO ₄ ³⁻	CO ₃ ²⁻ SO ₄ ²⁻ CrO ₄ ²⁻ / AsSO ₄ ³⁻ VO ₄ ³⁻ CO ₃ . F ³⁻ CO ₃ .OH ³⁻ / SiO ₄ ⁴⁻
F ⁻	OH ⁻ Cl ⁻ Br ⁻ / O ²⁻
CRANDALITA	
Ca ²⁺	Sr ²⁺ Ba ²⁺ Pb ²⁺ / Y ³⁺ TR ³⁺ Bi ³⁺ / U ⁴⁺ Th ⁴⁺
Al ³⁺	Sc ³⁺ Ga ³⁺ Fe ³⁺ / Zr ⁴⁺ / Nb ⁵⁺
PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻ / VO ₄ ³⁻ AsO ₄ ³⁻ / SiO ₄ ⁴⁻

Tabela 7 – Confrontação entre o conteúdo de elementos traços em fosfatos marinhos, francolita e crandallita de Taiba (Samb, 2000), e fosfatos de Sapucaia (crandallita-goyazita, woodhouseíta-svanbergita e wardita).

Elementos traços	Fosfatos marinhos	Francolita de Taiba	Crandallita de Taiba	Fosfatos de Sapucaia
Empobrecimento	Co, Ga, Hg, Sn, Ti, Zr	As, Ba, Ga, La, Mn, Mo, Pb, Sc, Se, Sn, Ti, Zr	As, Cu, Mn, Mo, Ni, Ti	Be, Rb, Sb, Cs
Enriquecimento	Ag, Cd, La, Mo, Pb, Se, Sr, U, Y, Zn	Ag, Cd, Cr, Hg, U, V, Y, Zn	Ag, Ba, Cd, Cr, Hg, La, Se, Sr, U, Y	Sr, S, Sc, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Y, Mo, Sn, W, Hg, Bi, U
Abundância normal	As, Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Sc, V	Co, Cu, Ni, Sr	Co, Ga, Pb, Sc, Sn, V, Zn, Zr	V, Co, Ga, Zr, Nb, Ba, Hf, Ta

Os elementos terras raras em particular, também mostram forte afinidade aos fosfatos tipo crandallita-goyazita, enriquecendo-os no perfil laterítico principalmente quando na presença de Ba. Este comportamento tem sido verificado na maioria dos depósitos de fosfatos com a formação de fosfatos de alumínio tipo crandallita-goyazita-florencita, tais como Mont Weld (Lottermosser, 1990), Araxá (Toledo, 1999), Catalão (Toledo, 1999), Maicuru (Lemos, 1990; Angélica, 1991), que por estarem relacionados a substrato alcalino-ultramáfico carbonático, apresentam teores de ETR ainda mais elevados. Os valores dos ETR em Sapucaia, se equivalem aos de Jandiá (Costa, 1991) e de outros depósitos mundiais (Lam-Lam, Phosphoria Formation), cujo substrato é de origem sedimentar, fosforítico ou equivalente.

De acordo com as características mineralógicas e geoquímicas abordadas, os depósitos de Sapucaia e Jandiá, em que a rocha fonte ainda não foi identificada, se equivalem e certamente possuíram um substrato constituído por pacotes de pelitos mineralizados em fosfatos primários. Na região, a sequência constituída pela rocha fonte/saprólito ainda não foi atingida, porém no entorno dos dois depósitos já foram identificadas unidades sedimentares representativas do Paleozóico e Mesozóico da bacia sedimentar do Parnaíba, com unidades com contribuição marinha e mineralizações apatíticas, embora nenhuma delas tenha apresentado potencial para a exploração econômica. Dentre as formações portadoras de mineralizações de fósforo pode-se ressaltar a Formação Pimenteiras, aflorando parcialmente em regiões próximas da borda da bacia (Figura 45). Esta formação é constituída por folhelhos e folhelhos sílticos com laminações *wavy* e *linsen* a arenitos amalgamados. É possível portanto que uma das formações tenha aflorado na região Nordeste do Pará, ao lado de muitas outras unidades geológicas complexas, expostas às condições que propiciaram a lateritização matura que deu origem aos depósitos de fosfatos desta região.

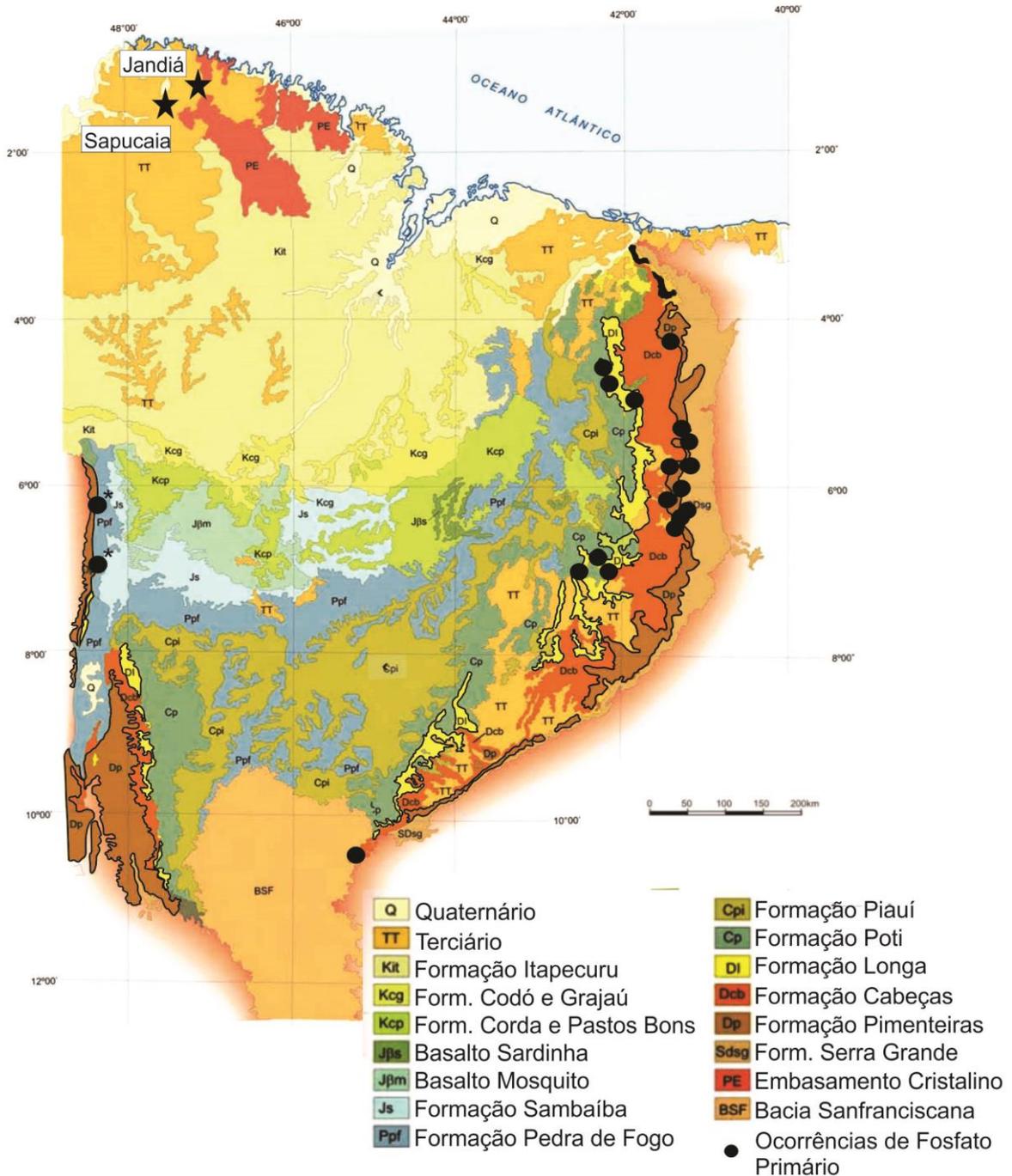


Figura 45 – Ocorrências de fosfatos primários nas bordas da Bacia do Parnaíba (Projeto Fosfato, CPRM) que poderiam se estender até a região do Morro Sapucaia e Jandiá (porção noroeste da área). Em destaque as formações Longá e Pimenteiras (modificado de Santos, 2004). *Ocorrência definida a partir de comunicação verbal de Dr. Marcondes Lima da Costa.

8 CONCLUSÕES

O Morro Sapucaia é portador de um importante perfil laterítico rico em fosfatos de alumínio, e está relacionado a um grupo de ocorrências fosfáticas presente predominantemente na região costeira dos estados do Pará e Maranhão. Ainda que de pequeno porte quando comparado aos extensos platôs bauxíticos terciários do sudeste do Pará, o morro Sapucaia é portador de horizonte laterítico centenas de vezes mais enriquecido em P_2O_5 do que o esperado para a média crustal.

A partir da base, o perfil laterítico é formado por um horizonte saprolítico argiloso, predominantemente caulínico, com diversas intercalações arenosas, por vezes concentradas em minerais ferruginosos que imprimem a cor avermelhada à alvura do argilomineral. O contato inferior gradual dá-se a níveis sedimentares argiloferruginosos ricos em muscovita e que não contém indícios do processo de lateritização, sendo considerado então como o substrato do perfil de alteração. A crosta aluminofosfática acima é constituída principalmente por fosfatos aluminosos da série crandallita-goyazita, e ainda woodhouseíta-svanbergita, wardita-millisita, wavelita, hematita, goethita e minerais resistatos. A crosta ferroaluminosa fosfática acima apresenta textura nodular ferruginosa com matriz fosfática, em um arranjo de “pele-de-onça” observado de forma semelhante apenas em Jandiá e Trauíra. O ambiente atual que favorece condições erosivas a região, removeu quase que totalmente a cobertura terciária que outrora se instalou sobre o perfil, e hoje mantém apenas uma parte da couraça ferruginosa, cujos fragmentos compõem em sua maioria, o colúvio mineralizado que recobre a porção leste do morro Sapucaia.

O padrão geoquímico assinalado em Sapucaia é condizente a uma formação laterítica mineralizada fundamentalmente em fosfatos de alumínio, tais como o aumento significativo do saprolito para a crosta (base para o topo) de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 e TiO_2 e decrescentes de SiO_2 , MgO e K_2O , bem como os altos valores absolutos de CaO , SrO , e SO_3 , típicos de fosfatos secundários da série crandallita-goyazita. P, S, Sr, Ca, Na, Fe e Si sofreram mobilidade absoluta durante a formação do perfil, onde P, S, Sr, Ca, Na e Fe foram transportados e retidos, enquanto Si foi mobilizado e lixiviado. Al e Ti apresentam comportamento tipicamente residual.

Os elementos V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Y, Zr, Hf, Th, U, ETR, Ga, Sn, Zr, Hf, Nb, Ta aumentam de teores do horizonte argiloso para a crosta fosfática e para a ferroaluminosa fosfática, já Co, Ni e Cu, possuem teores muito abaixo da média crustal. Rb e Cs são os únicos elementos traço analisados em que os seus teores diminuem ao longo do perfil laterítico da base para topo, em nítida relação com a eliminação da muscovita. A somatória das concentrações

dos ETR que aumenta da base para o topo do perfil é quase o triplo da média crustal, mostrando uma forte afinidade com fosfatos do tipo crandallita-goyazita.

Ainda que a indicação da ocorrência da série woodhouseita-svanbergita seja até então inédita entre os depósitos lateríticos da região do Gurupi, a alta similaridade da assembleia mineralógica e os padrões geoquímicos identificados permitem correlacionar o laterito maturo e completo do morro Sapucaia com as demais ocorrências registradas nas regiões costeiras dos estados do Pará e Maranhão, mais especificamente com os depósitos de Jandiá e Trauíra.

As relações mineralógicas e geoquímicas existentes com Jandiá permite inferir que os depósitos contaram possivelmente com a mesma rocha fonte de fósforo primário, tal como formações sedimentares mineralizadas aflorantes na borda oeste da Bacia do Parnaíba.

Os dados obtidos mostram que o depósito de Sapucaia guarda grandes similaridades com o depósito de Jandiá, e apontam que ambos possam derivar de rochas sedimentares provenientes da Bacia do Parnaíba. Rochas sedimentares enriquecidas em fósforo primário nesta bacia são conhecidas sob várias ocorrências, predominantemente na sua porção oriental, ainda pouco investigadas quanto ao volume e extensão de seus recursos.

REFEFÊNCIAS

- Abreu S.F. 1937. Nota sobre os fosfatos de Trauhira (bauxita e laterita phosphorosa). *Serviço de Fomento da Produção Mineral*, **13**:133-172.
- Altschuler Z.S. 1973. The weathering of phosphate deposits - geochemical and environmental aspects. *In: Griffith, E.J., Beeton, A. Spencer, J.M. and Mitchell, D.T. - John Wiley & Sons (eds.) Environmental Phosphorus Handbook*, **3**:33-95.
- Angélica R.S. 1991. Dispersão mineralógica e geoquímica em crostas e solos lateríticos aplicada à caracterização do substrato do Complexo de Maicuru, Pará. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará-UFPA, 168 p.
- Angelica R.S.; Costa M.L. 1990. Associações geoquímicas nos lateritos superficiais do Complexo de Maicuru, Para. *In: XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia*. Natal, Resumos: 88-89.
- Angélica R. S.; Costa, M. L. 1991. Associações geoquímicas nos lateritos superficiais do Complexo de Maicuru, Estado do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, **1/2**:101-115.
- Angélica R.S.; Costa M.L. 1993. Geochemistry of rare-earth elements in surface lateritic rocks and soils from the Maicuru complex, Para, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, **47**:165-182.
- Angélica R.S. 1996. Mineralógica e geoquímica de gossans e lateritos auríferos na região de Carajás: Depósitos de Igarapé Bahia e Águas Claras. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará-UFPA, 138p.
- Arai M.; Shimabukuro, S. 2003. The Tortonian unconformity and its relation with the stratigraphic framework of the Barreiras Group and correlative units (Neogene, Brazil). *In: 3rd Latinamerican Congress of Sedimentology*, Belém. Abstract, p.: 263-264.
- Argentièrre R. 1971. Notas sobre a ilha de Trauíra. *Mineração e metalurgia*, **54(321)**: 110-112p.
- Bardossy G. & Aleva, G.J.J. (Eds.) 1990. *Lateritic bauxites. developments in economic geology* 27. Elsevier, Amsterdam, 624 pp.
- Blanchard F.N. 1972. Physical and chemical data for crandallite from Alachua County, Florida. *Amercan Mineralogist*, **(57)**:473-484.
- Blount A.M. 1974. The crystal structure of crandallite. *American Mineralogist*, **59**:41-47.
- Bonnot-Courtois C. & Flicoteaux, R. 1989. Distribution of rare-earth and some trace elements in Tertiary phosphorites from the Senegal Basin and their weathering products. *Chem. Geol.* **75**: 311-328.

- Bourouilh-Le J.F. 1989. The oceanic karts: modern bauxite and phosphate ore deposits on the high carbonate islands (so-called “uplifted atolls”) of the Pacific Ocean [In:] P. Bosák, D.C. Ford, J. Glazek & Horáček (Eds.): *Paleokarst. A systematic and regional review*. Elsevier-Academia, Amsterdam, Praha, 443–471.
- Brandt F. 1932. Ein neuer Typ von Eisen-Tonerde-Phosphat-Vorkommen (Maranhão Nordbrasilien). *Chemie der Erde*. Jena, **7**:383-425.
- Cook P.J. 1984. Spatial and temporal controls on the formation of phosphate deposits – A Review. In: Nriagu & Moore (eds.) *Phosphate Minerals*. Springer-Verlag, p.:242-274.
- Capedcombe L. 1953. Etude minéralogique des gites de phosphatés alumineux de la région de Thiés (Sénégal). *Congr. Géol. Int. Comptes Rendus*, XI Session, Alger, pg. 103-118.
- Carvalho J.M.A, 2000a. Recursos Minerais. In: Costa, J.L. (org.). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Folha Castanhal (AS.23-V-C). Estado do Pará. Escala 1:250.000. Nota Explicativa (consulta on line). Belém: CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Carvalho J.M.A, 2000b. Recursos Minerais. In: Almeida, H.G. (org.). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, São Luís SW/NW, Folhas AS.23-V e SA.23- Y, Estados do Pará e Maranhão. Escala 1:500.000. Nota Explicativa (consulta on line). Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Carvalho J.M.A, Viglio, E.P., Rezende, N.G.A.M., Rosa-Costa, L.T., Klein, E.L., Vasquez, M.L., Barbosa, J.P.O., Macambira, E.M.B., Araújo, O.J.B., 2003. Integração geológica nos distritos mineiros do Pará. In: Simpósio Geologia Amazônia, 8. Manaus, 2003. Anais, Manaus, SBG. CD-ROM.
- Castor B.; Hedrick J.B. 2006. Rare Earth Elements, 2006. In: *Industrial Minerals and Rocks*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. p.: 769-792.
- Cathcart J.B. 1976. Phosphate Investigations in Brazil, 1975. *United States Geological Survey*, 25pp.
- Cathcart J.B. 1989. The phosphate deposits of Florida, with a note on the deposits in Georgia and South Carolina, USA, in Notholt, A.J.G., Sheldon, R.P., and Davidson, D.F., (eds.) *Phosphate deposits of the world*, Cambridge, Cambridge University Press, **2**:62-70.
- Cordell D.; White, D.S. 2009. "The Story of Phosphorus: Global Food Security and Food for Thought". *Global Environmental*, **19**:262-305.
- Correa S. L.; Costa, M. L. 1997. Mineralogia das crostas lateríticas ferruginosas de Seis Lagos (Amazonas). *Geociências* (São Paulo), **16**(1):141-156.

- Costa J.L.; Boas, J.V.M.; Pastana, J.M.V.; Wanderley, V.J.R.; Araujo, A.A.F.; Frizzo, S.J. 1975. Projeto Gurupi. Relatório Preliminar. Belém, DNPM/CPRM, 1, 251p.
- Costa J.L.; Boas, J.V.M.; Wanderley, V.J.R.; Araujo, A.A.F.; Frizzo, S.J. 1977. Projeto Gurupi. Relatório Final de Etapa. Belém, DNPM/CPRM, 1, 258p.
- Costa J.L. 2000. Folha Castanhal (SA-23-V-C). Estado do Pará, escala 1:250.000 (Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil/Programa Grande Carajás). Brasília, CPRM, CD-ROM.
- Costa M.L.; Costa, W.A.M.; Sá, J.H.S. 1978. Fosfatos da região nordeste do Estado do Pará e noroeste do Maranhão. *In: Congresso Brasileiro de Geologia. Resumo*, p.:115-116.
- Costa M.L. 1980. Geologia, mineralogia, geoquímica e gênese dos fosfatos de Jandiá, Cansa Perna e Itacupim no Pará, e Trauíra e Pirocaua no Maranhão. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação de Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará-UFPA, 132p.
- Costa M.L., Costa, W.A.M., Schwab, R.G. 1980. Mineralogia das ocorrências de fosfatos lateríticos do Pará e Maranhão (Brasil). *In: SBG, Congresso Brasileiro Geologia. Balneário de Camboriú, Anais*, 4:1982-1996.
- 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, Congresso Brasileiro Geologia*, 3:1459-72.
- Costa M.L. 1982. Petrologisch-geochemische untersuchungen zur gênese der bauxite und phosphate-laterite de region "Gurupi" (Ost-Amazonien). Tese de doutorado, Universidade Erlangen-Nuernberg, Alemanha. 190p.
- Costa M.L. 1984. A dinâmica de formação de lateritas: o exemplo do NE do Pará e NW do Maranhão. *In: SBG, Congresso Brasileiro Geologia. Rio de Janeiro, Anais*, p.:4823-4837.
- Costa M.L. 1987. Uma contribuição geoquímica do desenvolvimento intempérico de Anitápolis - SC. *In: Congresso Brasileiro Geoquímica. Porto Alegre, Anais*, p.:17-34.
- Costa M. L.; Siqueira, N. V. M. 1987. Fosfatos aluminosos brasileiros como fonte alternativa de estrôncio. *Ciência e Cultura (SBPC)*, 39:1116-1120.
- Costa M. L.; Siqueira, N. V. M. 1987. Correlação geoquímica entre apatita e crandallita. *Revista da Escola de Minas*, p.:231-239.
- Costa M.L.; Costa, W.A.M. 1987. Distribuição dos terras raras na solução sólida crandallita-goyazita de Sapucaia (Bonito-Pará). *In: IV Congresso Brasileiro de Geoquímica*, 1:53-69.
- Costa M.L. & Siqueira, N.V.M. 1988. Correlações geoquímicas entre apatita e crandalita. *Revista da Escola de Minas, UFOP. II Simpósio Brasileiro de Geoquímica*, p.:231-239.

- Costa M.L. 1990. Mineralogia, gênese e epigênese dos lateritos fosfáticos de Jandiá, na região Bragantina (NE do Pará). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **4(1)**: 85-110.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira Geociências*, **21(2)**:146-160.
- Costa M.L.; Angélica, R.S.; Avelar, J.O.G. 1991. Outeiro e Mosqueiro: exemplos de evolução laterítica imatura. Anais do III Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, Pará. p.: 479-494.
- Costa M. L.; Fonseca, L. R.; Lemos, V. P.; Angélica, R. S. 1991. Geochemical Exploration Of The Maicuru Ultramafic-Alkaline-Carbonatite complex, Northern Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**:193-204.
- 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: III Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém-Pará. Anais, p.:512-526.
- Costa M.L.; Araújo, E.S. 1996. Application of multi-element geochemistry in Au-phosphate-bearing lateritic crusts for identification of their parent rocks. *Journal of Geochemical Exploration*, **57**:257-272.
- Costa M.L. 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Exploration Mining Geology*, **6**: 79-104.
- Costa M. L.; Angélica, R. S.; Costa, N. C. 1999. The geochemical association Au-As-B-(Cu)-Sn-W in latosol, colluvium, lateritic iron crust and gossan in Carajás, Brazil: importance for primary ore identification. *Journal of Geochemical Exploration*, **67(1-3)**: 33-49.
- Costa M.L., Fernández, O.J.C., Toledo, M.C.M., Passos, C.M., Pereira, P.F. 2004. A turquesa de Itacupim. *Revista Escola de Minas*, **57(4)**:261-266.
- Costa M. L.; Oliveira, S. B.; Costa, G. M.; Choque, O. J. 2004 . Morfologia e química mineral da goethita de pedra de ferro de interface areia-argila em sedimentos da formação Barreiras, Amazônia Oriental. *Geochimica Brasiliensis*, **18(2)**:121-133.
- Costa M.L.; Fernandez, O.C.; Toledo, M.C.M.; Poellmann, H.; Passos, C.M. & Pereira, P.F. 2005. Tuerkis und andere Phosphate aus Itacupim/Ostamazonien-Brasilien. *Aufschluss*, **56**:61-68.
- Costa M.L. 2008. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. In:Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não metálicos, óleo e gás. Otavio Augusto Boni Licht et al. (orgs.). SBGq, in press.

- Costa M. L.; Sousa, D. J. L.; Angélica, R. S. 2009. The Contribution of Lateritization Processes to the formation of the Kaolin Deposits From Eastern Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**:219-234.
- Cowgill U.M. & Hutchinson, G.E. 1963. An apparently triclinic dimorph crandallite from a tropical swamp sediment in El Peten, Guatemala. *American Mineralogist*, **48**:114-1153.
- Cooper J.; Lombardi, R.; Boardman, D.; Carliell-Marquet, C. 2011. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, **57**:78-86.
- Chernoff C.B.; Orris, G.J. 2002. Data Set World Phosphate Mines, Deposits, and Occurrences - Part A. Geologic Data. *United States Geological Survey*, Open-File Report OF02-156A, 352p.
- Cruz G.S. 2011. Bauxita, horizonte nodular e cobertura argilosa da região de Paragominas e Juruti, Estado do Pará. Dissertação de Mestrado. PPGG-UFPA. Belém. 93pg.
- 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. V.2 (19).
- Dill H.G.; Fricke, A.; Henning, K.H. 1995. The origin of Ba and REE-bearing aluminium-phosphate-sulphate minerals from the Lohrheim kaolinitic clay deposit (Rheinisches Schiefergebirge, Germany). *Applied Clay Science*, **10**:231-245.
- Dill H.G. 2001. The geology of aluminum phosphates and sulphates of the alunite group minerals: a review. *Earth Science Reviews*, **53**:35-93.
- Diop M.B. 2012. Use of phosphate waste as a building material (Senegal). *In*: Industrial Waste, p.: 173-190.
- Dunn P. J. 1980. Carbonate-fluorapatite from near Fairfield, Utah. *The Mineralogical Record*, **11**:33-34.
- Erdosh G. 1979. The Ontario Carbonatite Province and phosphate potential. *Economic Geology*, **74**:331-338
- Evensen N.M.; Hamilton, P.J.; Onions, R.K. 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **42(8)**: 1199-1212.
- Ferrari V.C.; Melfi, A.J.; Oliveira, J.J. 1998. Geoquímica e mineralogia dos produtos de alteração e de paleoalteração de rochas fosfatadas da região de Irecê, BA. *Gochimica Brasiliensi*, **12(1/2)**: 041-053.

- Ferrari V.C. 2000. Fosfatos primários e secundários nos perfis de intemperismo sobre os maciços alcalino-carbonatíticos de Juquiá (SP), Anitápolis (SC) e Tapira (MG). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo-USP. 208p.
- Feytis A. 2010. "North Africa Builds Its Minerals Future." *Industrial Minerals*, p.:55-61.
- Figueiredo M.C.H. 1985. Introdução à Geoquímica dos Elementos Terra Raras. *Boletim do Instituto de Geociências-USP*, **16**:15-31.
- Flicoteaux R. & Lucas, J. 1984. Weathering of phosphate minerals. *In: Nriagu & Moore (eds.) Phosphate Minerals*. Springer-Verlag, p.:292-317.
- Gharbi A. 1998. Les phosphates marocains. *Chronique de la Recherche Minière*, **531-532**:127-138.
- Góes A.M. 1981. Estudo sedimentológico dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecurú, no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará-UFPA, 55p.
- Góes A.M; Rossetti, D.F.; Nogueira, A.C.R.; Toledo, P.M. 1990. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências da Terra*, **2**:3-15
- Gonçalves D.F.; Kotschoubey, B. 2000. Estudo da cobertura laterítico-bauxítico da Serra do Piriá - NE do Estado do Pará. *In: Seminário de Integração Acadêmica da UFPA*, 1, Belém. Resumos, CD-ROM.
- Gonçalves D.F.; Kotschoubey, B. 2001. Caracterização e gênese da cobertura laterítica-fosfática do Morro de Jandiá, NE do Estado do Pará. *In: SBG/NO, Simpósio de Geologia da Amazônia*, 7, *Resumos expandidos* - CD-ROM, ST 5, p.: 66-69.
- Gonçalves D.F., Kotschoubey, B., Maurity, C. 2001. Cobertura de alteração laterítica-bauxítica da Serra do Piriá e fosfatos associados - NE do Estado do Pará. *In: (SBG) Simpósio Geologia Amazônia*, Belém. Anais, SBG. CD-ROM.
- Goyne K.W.; Brantley, S.L.; Chorover, J. 2010. Rare earth element release from phosphate minerals in the presence of organic acids. *Chemical Geology*, **278**:1-14.
- Greiffo W.; Hermann, K.; Muller, G.; Strauss, W. 1984. Sr-gorceixite, a weathering product in rich iron ores from the Córrego do Feijão, Minas Gerais, Brazil. *Contributions Mineralogy Petrology*, **87(4)**:418-419.
- Hallberg J.A. 1984. A geochemical aid to igneous rock identification in deeply weathered terrain. *Journal of Geochemical Exploration* 20, 1-8.

- Hein J.R. 2004. Life cycle of the Phosphoria Formation; from deposition to the post-mining environment: Amsterdam, Elsevier, 635 p. Loughman, D.L., 1984, Phosphate authigenesis in the Aramachay Formation (Lower Jurassic) of Peru. *Journal of Sedimentary Petrology*, **54(4)**:1147-1156.
- Hein J.R., Perkins, R.B., McIntyre, B.R. 2004. Evolution of thought concerning the origin of the Phosphoria Formation, western US Phosphate Field. *In*: Hein, James R. (Eds.) *Life Cycle of the Phosphoria Formation: From Deposition to Post-Mining Environment*. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, **8**:19-42.
- Hiatt E. E.; Budd, D. A. 2001. Sedimentary phosphate formation in warm shallow waters: new insights into the palaeoceanography of the Permian Phosphoria Sea from analysis of phosphate oxygen isotopes Original Research Article. *Sedimentary Geology*, **145**:119-133.
- Horbe A.M.C. & Costa, M.L. 2005. Lateritic crust and related soils in eastern Brazilian Amazonia. *Geoderma*, **126**:225-239.
- Imbernon R.A.L. 1993. Evolução geoquímica e mineralógica dos produtos de alteração intempérica sobre rochas do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão I (GO). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo- USP, 131p.
- Issler R.S. 1978. The Seis Lagos carbonatite complex: Poços de Caldas, Brasil. *In*: I Simpósio Internacional de Carbonatitos, Poços de Caldas, Brazil, p. 233-240.
- Jarvis I. 1992. Phosphate deposits of the world volume 3: Neogene to modern phosphorites. *Earth-Science Reviews*, **33**:68-70.
- Jasinski S. 2005. "Phosphate Rock Reserves in the United States." *In*: IFA Production and International Trade Conference, Sao Paulo, 8pp.
- Johan Z. 1976. Senegalite, $\text{Al}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})_3 \text{H}_2\text{O}$, a new mineral (in French). *Lithos*, **9**: 165-171.
- Johnson A.K.; Rat, P.; Lang, J. 2000. Le bassin sédimentaire à phosphate du Togo (Maastrichtian-Eocene): stratigraphie, environnements et evolution. *J. Afr. Earth Sci.* **30**:183-200.
- Kahn H. 1988. Caracterização mineralógica e tecnológica da jazida de fosfato do Maciço de Anitápolis, SC. São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de São Paulo - USP, 219p.
- Kotschoubey B. 1984. Bauxitas do Baixo Nhamundá, região do Médio e Baixo Amazonas - natureza e gênese. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. Rio de Janeiro. Anais, **8**:3926-3940.

- Ktschoubey B.; Calaf, M.J.C.; Lobato, A.C.C.; Leite, A.S.; Azevedo, C.H.D. 2005. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da província bauxitífera de Paragominas, noroeste da Bacia do Grajaú, nordeste do Pará/oeste do Maranhão. *In: O.J. Marini, E.T. Queiroz, B.W. Ramos (eds.) - Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. CT-MINERAL/FINEP, ADIMB. Brasília-DF. p.: 691-782.*
- Kotschoubey B.; Truckenbroudt, W.; Calaf, J.M.C. 2005. Evolução geológica da porção meridional da província bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (nordeste da Bacia do Grajaú, nordeste do Pará e extremo oeste de Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, **35(2)**: 263-272.
- Larsen E.S. 1942. The mineralogy and paragenesis of the variscite nodules from near Fairfield, Utah. *Am. Mineralogist*, **27**:231-300; 350-371 e 441-451.
- Lemos V.P.; Costa, M.L. 1987. Partição dos Terras Raras nos Lateritos Fosfáticos de Maicuru. *In: Congresso Brasileiro de Geoquímica. Porto Alegre, Anais*, **1**:83-102.
- Lemos R.L.; Fonseca, L.R.; Martins, L.P.B. 1988. Petrografia do complexo alcalino-ultramáfico-carbonatítico de Maicuru, Pará. *In: 35º Congresso Brasileiro de Geologia. Belém. (3)*: 1400-1411.
- Lemos V.P. 1990. Evolução mineralógica e geoquímica de lateritos sobre rochas do complexo de Maicuru-PA. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará-UFPA, 274p.
- Li J.; Ying, J.; Zhong, B. 2006. "Phosphate Rock Resources and Fertilizer Production in China." *In: IFA Crossroads Conference, Chiangmai, Thailand, p.:13-16.*
- Lottermosser B.G. 1990. Rare-earth element mineralization within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia: *Lithos*, v. **24**:151-167.
- Maksimović Z. & Pantó, G. 1985. Neodymian goyazite in the bauxite deposit of Vlasenica, Yugoslavia. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*, **34**: 159-165.
- Mining Journal. 2007. Phosphate Rock 2007. Mining Journal Ltd., London.
- 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 Geology Reviews*. **63**: 76-90.
- Mordberg L.E. 1999. Geochemical evolution of a Devonian diaspora-crandallite-svanbergite-bearing weathering profile in the Middle Timan, Russia. *Journal of Geochemical Exploration*, **66**:353-361.

- Moyle P.R.; Piper, D.Z. 2004. "Western Phosphate Field-Depositional and Economic Deposit Models." *In: R. Hein Life (eds.) Cycle of the Phosphoria Formation: From Deposition to the Post-Mining Environment*, Elsevier Science B.V, Amsterdam, The Netherlands, p.:575-598.
- Nahon D.B. 1991. Self-organization in chemical lateritic weathering. *Geoderma*, **51**:5-13.
- Notholt A.J.G. 1991. African phosphate geology and resources: a bibliography, 1979-1988. *Original Research Article Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, **13**:543-552.
- Notholt A.J.G.1994. Phosphate rock in developing countries: a review of geology, resources and development. *In: Mathers SJ and A.J.G Notholt (eds.) Industrial minerals in developing countries*. AGID Report Series Geosciences in International Development, **18**:193-222.
- Notholt A. J. G.; Sheldon, R. P.; Davidson, D. F. (Eds.) 1989. *Phosphate deposits of the World*, 2, 566p. (ISBN 0-521-305098).
- Nyiri K. 2010. "Phosphate Rock Outlook," Paper presented at British Sulphur. Events Phosphates 2010, Brussels, Belgium, p.:22-24.
- Oliveira N.P. 1977. Fosfatos da região de Santa Luzia. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação de Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará-UFPA, 74p.
- Oliveira N.P. 1980. Mineralogie und geochemie der phosphatfuhrenden laterite von Iatacupim und Trauíra, nordbrasilien. Doutorado em Geociências. Mineralogisches Institut der Friederich-Alexander-Universiteat Erlangen-Nurembergue. Alemanha. 198p.
- Oliveira N.P.; Schwab, R.G. 1980. Itacupim: Um exemplo da influência do fósforo sobre o desenvolvimento de perfis lateríticos - *In: Anais do XXXI Congresso Brasileiro Geologia*. Santa Catarina, p.:184-196.
- Oliveira N.P. & Costa, M.L. 1984. Os fosfatos aluminosos do Pará e do Maranhão: estágio atual de conhecimentos e estratégia para o aproveitamento econômico. *Ciências da Terra*, **10**:16-19.
- Orris G.J.; Chernoff, C.B. (Eds). 2002. Data set of world phosphate mines, deposits, and occurrences; Part B, Location and mineral economic data. *United States Geological Survey*, Open-File Report 02-0156B, 328 pp.
- Orris G.J; Chernoff, C.B. 2004. Chapter 20: Review of world sedimentary phosphate deposits and occurrences. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, **8**:559-573.
- Passos C.M. 2002. Mineralogia, micromorfologia e geoquímica dos fosfatos de Itacupim, PA. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo (USP), 40pp.

- Peixoto S.F. 2006. Mineralogia e geoquímica de perfis lateríticos no nordeste do Estado do Amazonas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 122p.
- Reymão M.F.F. 1982. Estudo físico-químico de hidroxifosfatos e minerais associados ocorrentes na chapada de Pirocaua (MA) e no morro de Jandiá (PA). Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará-UFPA, 153p.
- Reymão M.F.F. 1982b. Caracterização de hidroxifosfatos por espectroscopia no infravermelho e análise térmica diferencial, amostras de Pirocaua (MA) e Jandiá (PA). *In: Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, Bahia, 2.*
- Ricci P.S.F. & Costa, J.L. 2000. Estratigrafia. *In: Costa, J.L. (org.). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Folha castanhal (SA.23-V-C). Estado do Pará. Escala 1:250.000. Nota Explicativa (consulta on line). Belém: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.*
- Russ W. 1924. The phosphate deposits of Abeokuta Province. *Geol. Surv. Nigeria Bull. 7.* 43pp.
- Samb M. 2002. Evolution géochimique des phosphates sédimentaires du gisement de Tobene (Senegal), implications pour l'exploitation industrielle. *Journal des Sciences. (2):* 68-74.
- Santana L.G.; Riccomini, C.; Valarelli, J.C. 1999. Ocorrência de fosfatos de terras raras na Formação Resende, paleógeno do *rift* continental do sudeste do Brasil. *Revista do Instituto Geologia, 20:*37-47.
- Santos A.C.F. 1996. Caracterização química e mineralógica de bauxitas da Amazônia Oriental através de métodos por fluorescência de raios-x e difração. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará-UFPA, 184p.
- Santos M.E.C.M. 2004. Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú, e São Luís. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. CPRM-Serviço Geológico do Brasil. Rio e Janeiro. CD-Rom.
- Santos P.H.C.; Costa, M.L.; Leite, A.S.; Silva, G.J.S.; Marques, G.T.; Almeida, H.D.F. 2012. Mineralogia do Caulim de Sapucaia (Bonito-Pará). *In: 46º Congresso Brasileiro de Geologia e 1 Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa. Santos-SP. CD-ROM.*
- 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. Athens, Theophrastus, 2:*369-386.
- Schwab R.G.; Herold, H.; Gotz, C. & Oliveira, N.P. 1990. Compounds of the crandallite type: Synthesis and properties of pure goyazite, gorceixite and plumbogummite. *Neues Jahrbuch Mineralogie Monatshefte, 3:*113-126.

- Shaw E.W; Wriugh, W.H.; Darnell, J. 1925. The mineral resources of Maranhão. *Brazil Economic Geology*, **20**:929-932.
- Sheldon R.P. 1989. Phosphorite deposits of the Phosphoria Formation, Western United States, in Notholt. *In*: A.J.G., Sheldon, R.P., and Davidson, D.F., (eds.) *Phosphate deposits of the world*, Cambridge, Cambridge University Press, p.:53-61.
- Siqueira N.V.M. 1982. O padrão de distribuição dos elementos principais e traços nas lateritas fosfatadas da Chapada de Pirocaua (MA). Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará-UFPA, 211p.
- Slansky M.; Lallemand, A.; Millot, C. 1964. La sédimentation et l'altération latéritique des formations phosphatées des Gisements de Taoba (République de Sénégal). *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr. Strasbourg*. **17(4)**: 311-324.
- Soubiès F.; Melfi, A.J.; Autefage, F. 1991. Comportamento Geoquímico dos Elementos Terras Raras nos Lateritos da Jazida de Fosfato e Titânio de Tapira (Minas Gerais, Brasil): a importância dos fosfatos. *Revista Brasileira de Geociências*, **21(1)**:3-16.
- Souza E.L.; Kotschoubey, B.; Lima, W.N. 2001. Indicadores geoquímicos do intemperismo atual na Serra do Piriá, nordeste do Estado do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, **15(1/2)**:49-63.
- Stamatakis M.G. 2004. Phosphate deposits of Neogene age in Greece. *Mineralogy, geochemistry and genetic implications Original Research Article Chemie der Erde - Geochemistry*, **64**:329-357.
- Socorro O.A.; Paes, E.T. 2012. A Formação Pirabas do Brasil (Mioceno Inferior) e a subprovíncia tropical do Atlântico Noroeste Central. Belém, *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, v.7, n.1.
- Tatumi S.H.; Silva, L.P; Pires, E.L.; Rossetti, D.R.; Góes, A.M.; Munita, C.S. 2008. Datação de sedimentos Pós-Barreiras no norte do Brasil: implicações paleogeográficas. *Revista Brasileira de Geociências*, **38(3)**: 514-524.
- Taylor S.R.; McClennan, S.M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications.
- The Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME). 2007. The SME Guide for Reporting Exploration Results, Mineral Resources, and Mineral Reserves, the 2007 SME Guide, the Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 47pp.
- Toledo M.C.M. 1999b. Os fosfatos aluminosos da série da crandallita – uma revisão. *Revista Instituto Geológico*, **20(1/2)**:49-63.

- Toledo M.C.M. 2000. A série da crandallita no manto laterítico sobre o maciço carbonatítico de Catalão I (GO, Brasil). *Geochimica Brasiliensis*, 14 (no prelo).
- Toledo M.C.M.; Ferrari, V.C.; Neto, A.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). *Revista Brasileira de Geociências*, **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 na Ilha de Itacupim (PA) -mineralogia, micromorfologia e geoquímica. Instituto de Geociências/UFRGS. *Pesquisas em Geociências*, **33(2)**:109 -122.
- Valeton I. 1994. Element concentration and formation of ore deposits by weathering. *Catena*, **21**:99-129.
- Van Kauwenbergh S. J. 1990. Mineralogy and alteration of the phosphate deposits of Florida: a detailed study of the mineralogy and chemistry of the phosphate deposits of Florida. *United States Geological Survey*, **19(3)**:1914.
- Van Kauwenbergh S.J. 1995. "Mineralogy and Characterization of Phosphate Rock." In: K. Dahanayake, S.J. Van Kauwenbergh, and D.T. Hellums (eds.) *Direct Application of Phosphate Rock and Appropriate Technology Fertilizers in Asia-What Hinders Acceptance and Growth*, Institute of Fundamental Studies, Kandy, Sri Lanka, pp.: 29-47.
- Vasquez M.L.; Rosa-Costa, L.T. 2008. Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de informações geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.
- Vieillard P.; Tardy, Y. & Nahon, D. 1979. Stability fields and aluminum phosphates: parageneses in lateritic weathering of argillaceous phosphatic sediments. *American Mineralogist*, **64**:626- 634.
- Wedepohl K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **59**: 1217-1232.
- Zanin Y.N. 1968. Zones of lateritic weathering of secondary phosphorites of Altay-Sayan Region. *Int. Geol. Rev.* 10: pp. 1119-1127.

ANEXOS

ANEXO I: Composição mineralógica centesimal das amostras do perfil laterítico.

Amostra	Cn	Gz	Wd/Sv	Wrd	Ms	Kln	Qz	Gth/Hem	Ant
SPD-7A	46,72	20,48	8,32	0,90	0,59	3,11	7,28	8,68	1,21
SPD-7B	35,02	11,84	8,87	0,64	0,93	5,84	9,28	19,29	1,55
SPD-7C	39,60	19,82	5,60	1,28	3,30	7,32	16,19	3,61	0,72
SPD-7D	35,15	12,27	14,06	0,39	0,42	6,10	2,52	19,13	1,86
SPD-7E	60,88	5,25	25,25	2,31	0,51	1,57	1,20	1,75	0,90
SPD-7F	63,94	13,54	15,01	0,64	0,00	4,15	0,85	2,22	1,34
SPD-7G	44,71	20,37	11,33	0,90	0,85	1,22	11,84	4,30	0,40
SPD11-A	35,41	12,47	15,69	0,77	0,59	7,26	12,39	7,17	1,14
SPD11-B	43,90	11,17	11,33	0,77	0,34	2,34	2,09	21,20	1,60
SPD11-C	31,35	16,92	17,88	9,76	1,10	11,34	3,42	1,10	0,35
SPD11-D	0,22	0,11	0,00	0,00	1,18	70,53	22,82	1,90	1,11
SPD17-A	24,56	13,68	4,91	0,64	0,25	8,32	39,99	2,40	1,51
SPD17-B	42,32	14,04	22,79	3,98	0,68	3,63	7,90	1,40	1,41
SPD17-C	42,17	10,95	29,20	0,51	0,85	10,36	1,27	0,90	1,07
SPD17-D	37,76	15,91	19,79	0,77	0,59	7,15	10,79	1,60	0,78
SPD17-E	0,22	0,19	0,00	0,39	6,43	57,02	32,44	1,33	0,80
SPD-24A	22,23	7,48	5,46	42,49	0,85	0,96	16,41	1,39	0,32
SPD-24B	43,40	13,85	8,32	5,26	1,02	3,60	23,96	1,43	0,17
SPD-24C	50,35	17,75	14,88	8,47	0,25	0,48	4,52	1,05	0,45
SPD-24D	55,08	11,47	27,98	1,54	1,10	1,97	1,43	1,16	0,68
SPD-24E	29,95	19,15	13,65	0,77	3,81	10,60	15,51	1,01	0,46
SPD-28A	20,58	7,66	3,96	0,51	0,34	11,39	43,85	5,16	1,26
SPD-28B	19,76	7,49	3,82	1,03	0,42	13,83	38,07	8,91	1,20
SPD-28C	29,43	13,46	11,33	4,88	0,68	12,99	21,10	1,59	1,22
SPD-28D	16,67	9,08	13,78	12,32	0,68	24,17	18,04	1,37	1,28
SPD-28E	15,76	7,08	6,96	18,10	0,76	26,92	15,25	4,54	1,16
SPD-30A	3,17	1,19	0,96	0,00	1,18	26,08	64,18	0,94	0,64
SPD-30B	29,99	9,07	4,37	0,51	1,44	13,41	36,00	1,56	0,91
SPD-30C	67,35	9,06	3,28	4,24	0,76	0,21	9,01	2,52	0,40
SPD-30D	49,12	22,53	6,69	1,03	1,10	2,08	11,47	2,21	0,66
SPD-30E	2,99	1,11	0,55	0,00	1,95	61,45	27,79	2,29	0,38
SPD-40A	50,89	16,56	18,56	0,77	0,34	2,78	4,35	2,30	0,68
SPD-40B	54,11	16,61	10,51	2,44	0,17	0,33	10,19	2,68	0,57
SPD-40C	43,38	11,26	9,14	12,45	0,17	0,08	19,83	1,38	0,35
SPD-40D	2,71	1,37	0,82	0,13	1,18	21,94	66,74	2,15	0,96
SPD-40E	0,79	0,64	0,68	0,00	0,68	22,42	63,53	7,59	0,84
SPD-40F	36,19	14,90	21,70	6,42	0,42	0,31	17,23	0,66	0,28
SPD-40G	34,56	18,36	15,15	0,77	1,95	5,39	15,55	1,14	0,80
SPD-41B	53,88	18,33	12,56	1,16	0,34	1,60	4,92	3,16	2,50
SPD-41C	50,45	17,14	17,47	1,41	0,59	1,30	2,96	1,98	1,65
SPD-41D	40,59	9,44	32,07	0,39	0,34	12,08	4,29	0,79	1,10
SPD-41E	43,83	9,51	31,93	0,64	0,59	7,83	2,22	1,12	0,85
SPD-41F	49,05	14,83	21,83	0,90	0,93	4,30	0,66	1,74	0,82
SPD-41G	3,41	3,25	2,32	0,26	1,02	79,31	7,26	1,24	0,70

ANEXO II: Composição química do perfil laterítico de Sapucaia em % peso (elementos maiores) e ppm (elementos-traço).

Amostras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SrO	SO ₃	LOI
SPD-7A	9,00	26,35	8,68	0,10	6,86	0,07	0,07	1,21	23,47	0,00	5,58	1,52	18,3
SPD-7B	12,42	22,93	19,29	0,06	5,31	0,05	0,11	1,55	18,10	0,00	3,71	1,62	16,1
SPD-7C	21,09	27,82	3,61	0,12	5,72	0,10	0,39	0,72	20,15	0,01	5,11	1,02	15,0
SPD-7D	5,55	24,73	19,13	0,05	5,66	0,03	0,05	1,86	19,41	0,01	4,42	2,57	18,7
SPD-7E	2,16	33,54	1,75	0,03	9,86	0,18	0,06	0,90	27,09	0,00	4,17	4,62	20,1
SPD-7F	2,78	32,00	2,22	0,06	9,62	0,05	0,00	1,34	27,74	0,01	4,82	2,74	19,1
SPD-7G	12,79	27,44	4,30	0,11	6,78	0,07	0,10	0,40	24,29	0,00	5,91	2,07	17,0
SPD11-A	16,04	26,13	7,17	0,06	5,80	0,06	0,07	1,14	19,44	0,00	4,66	2,87	19,2
SPD11-B	3,33	25,25	21,20	0,07	6,67	0,06	0,04	1,60	19,91	0,10	3,85	2,07	17,7
SPD11-C	9,19	32,09	1,10	0,05	5,39	0,76	0,13	0,35	24,77	0,00	5,91	3,27	19,2
SPD11-D	56,19	28,44	1,90	0,17	0,03	0,00	0,14	1,11	0,10	0,02	0,03	0,00	11,8
SPD17-A	43,98	18,98	2,40	0,10	3,64	0,05	0,03	1,51	13,11	0,01	3,65	0,90	12,3
SPD17-B	9,90	31,55	1,40	0,05	7,19	0,31	0,08	1,41	23,06	0,00	5,85	4,17	18,9
SPD17-C	6,48	34,08	0,90	0,03	7,58	0,04	0,10	1,07	23,14	0,00	5,91	5,34	19,3
SPD17-D	14,39	29,51	1,60	0,05	6,38	0,06	0,07	0,78	22,53	0,01	5,91	3,62	17,2
SPD17-E	61,89	25,30	1,33	0,12	0,03	0,03	0,76	0,80	0,15	0,01	0,00	0,00	9,5
SPD-24A	17,24	28,89	1,39	0,09	3,36	3,31	0,10	0,32	26,99	0,00	2,33	1,00	15,9
SPD-24B	26,09	24,54	1,43	0,05	6,41	0,41	0,12	0,17	22,32	0,00	4,09	1,52	14,3
SPD-24C	4,86	32,86	1,05	0,04	7,77	0,66	0,03	0,45	27,17	0,00	5,74	2,72	19,2
SPD-24D	2,85	34,18	1,16	0,02	9,25	0,12	0,13	0,68	26,61	0,00	5,89	5,11	19,0
SPD-28A	49,30	16,39	5,16	0,06	3,04	0,04	0,04	1,26	10,59	0,01	2,19	0,72	11,6
SPD-28B	44,70	17,18	8,91	0,06	2,92	0,08	0,05	1,20	10,89	0,01	2,13	0,70	11,6
SPD-28C	27,45	26,62	1,59	0,05	4,71	0,38	0,08	1,22	18,23	0,00	4,36	2,07	15,0
SPD-28D	29,59	28,59	1,37	0,04	3,14	0,96	0,08	1,28	15,90	0,00	3,67	2,52	15,1
SPD-28E	28,12	28,54	4,54	0,05	2,58	1,41	0,09	1,16	16,21	0,00	2,41	1,27	14,6
SPD-30A	76,85	12,68	0,94	0,07	0,49	0,00	0,14	0,64	1,71	0,00	0,38	0,17	6,0
SPD-30B	42,89	21,69	1,56	0,10	4,34	0,04	0,17	0,91	13,76	0,00	2,55	0,80	11,8
SPD-30C	9,45	31,05	2,52	0,08	9,33	0,33	0,09	0,40	27,69	0,00	2,42	0,60	16,5
SPD-30D	12,94	29,61	2,21	0,12	7,08	0,08	0,13	0,66	24,25	0,01	5,85	1,22	16,9
SPD-30E	57,28	26,69	2,29	0,08	0,44	0,00	0,23	0,38	1,59	0,00	0,31	0,10	10,7
SPD-40A	5,80	32,32	2,30	0,05	8,08	0,06	0,04	0,68	25,68	0,00	5,91	3,39	18,1
SPD-40B	10,42	30,06	2,68	0,04	8,00	0,19	0,02	0,57	24,85	0,02	4,97	1,92	18,1
SPD-40C	19,94	27,79	1,38	0,03	6,46	0,97	0,02	0,35	23,39	0,02	3,61	1,67	16,0
SPD-40D	77,49	10,94	2,15	0,06	0,42	0,01	0,14	0,96	1,59	0,00	0,15	0,15	5,6
SPD-40E	74,27	9,89	7,59	0,04	0,15	0,00	0,08	0,84	0,88	0,00	0,12	0,12	5,9
SPD-40F	17,56	28,65	0,66	0,03	6,29	0,50	0,05	0,28	23,26	0,00	5,91	3,97	16,7
SPD-40G	18,94	27,33	1,14	0,08	5,65	0,06	0,23	0,80	22,35	0,00	5,91	2,77	15,8
SPD-41B	5,82	30,34	3,16	0,08	8,10	0,09	0,04	2,50	24,75	0,03	5,60	2,30	19,2
SPD-41C	3,83	31,74	1,98	0,11	7,95	0,11	0,07	1,65	26,05	0,03	5,91	3,19	19,2
SPD-41D	1,49	34,44	0,79	0,02	7,55	0,03	0,04	1,10	25,11	0,02	5,91	5,86	20,3
SPD-41E	1,69	34,09	1,12	0,04	7,98	0,05	0,07	0,85	25,59	0,02	5,91	5,84	20,0
SPD-41F	3,08	33,11	1,74	0,05	8,04	0,07	0,11	0,82	25,82	0,02	5,91	3,99	19,5
SPD-41G	44,64	34,99	1,24	0,04	0,61	0,02	0,12	0,70	2,59	0,00	1,00	0,42	13,9

ANEXO II: Composição química do perfil laterítico de Sapucaia em % peso (elementos maiores) e ppm para elementos-traço (continuação).

Amostras	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se
SPD-7A	1	20	112	151,7	0,7	0,1	7,7	200	45,1	6,2	2,1
SPD-7B	0	25	188	215,6	1,4	2,4	31,4	192	42,7	21,3	3,2
SPD-7C	0	12	88	63,9	1,1	0,0	3,9	87	32,2	5,7	0,0
SPD-7D	3	48	252	463,2	0,9	0,6	10,6	90	74,9	9,6	0,0
SPD-7E	0	35	91	119,8	0,5	0,0	2,6	64	34,5	1,5	1,8
SPD-7F	1	47	107	143,7	1,1	0,0	0,9	115	47,8	0,7	0,0
SPD-7G	0	13	107	103,8	0,5	0,0	3,8	102	24,3	8,2	0,7
SPD11-A	2	26	165	231,6	0,9	2,1	3,2	53	42,8	4,4	0,7
SPD11-B	0	59	203	327,4	6,6	8,4	2,0	144	58,5	5,7	0,0
SPD11-C	0	5	77	63,9	1,0	0,0	0,7	18	29,0	0,0	0,0
SPD11-D	4	6	26	31,9	3,7	0,0	0,2	2	27,2	0,0	0,0
SPD17-A	4	17	78	151,7	1,0	1,4	3,4	130	36,7	2,0	0,6
SPD17-B	2	17	185	159,7	1,0	0,2	1,8	45	46,6	1,9	0,0
SPD17-C	2	19	159	151,7	0,8	0,1	2,4	37	41,8	0,0	0,0
SPD17-D	0	17	101	119,8	1,0	0,0	3,7	72	38,6	0,0	0,0
SPD17-E	0	10	33	95,8	0,9	0,0	0,3	8	22,0	0,0	0,0
SPD-24A	0	10	73	39,9	0,6	0,0	2,0	40	28,3	0,8	0,0
SPD-24B	2	8	53	55,9	0,2	0,0	1,9	59	25,2	0,9	0,7
SPD-24C	0	11	78	79,9	1,4	0,0	1,5	95	30,5	0,5	0,5
SPD-24D	28	25	100	79,9	0,2	0,0	0,4	51	29,0	0,5	0,0
SPD-28A	0	18	136	167,7	0,9	1,1	3,9	217	35,2	6,2	0,6
SPD-28B	3	19	165	183,7	1,6	2,8	13,9	425	34,1	10,9	0,6
SPD-28C	0	26	155	175,7	0,9	0,0	2,9	64	45,5	1,9	0,0
SPD-28D	2	19	116	135,8	0,6	0,1	2,8	27	45,0	1,1	0,0
SPD-28E	0	15	203	135,8	0,7	0,4	9,1	39	49,6	3,5	0,6
SPD-30A	7	9	80	87,8	2,9	0,9	1,8	37	17,5	0,6	0,0
SPD-30B	4	15	87	111,8	1,3	0,8	10,2	132	30,3	1,2	0,0
SPD-30C	3	5	74	63,9	1,1	0,0	51,2	82	25,7	2,9	1,1
SPD-30D	2	11	66	87,8	1,2	0,1	12,1	123	40,4	2,2	0,0
SPD-30E	2	4	34	31,9	1,0	0,1	1,7	18	24,2	1,1	0,0
SPD-40A	1	43	139	103,8	0,4	8,4	0,7	43	33,9	3,1	0,6
SPD-40B	1	25	87	95,8	0,6	1,8	0,8	61	36,1	2,7	0,7
SPD-40C	0	7	75	55,9	0,0	0,6	1,1	44	23,9	2,1	0,6
SPD-40D	0	11	83	71,9	2,1	0,4	1,4	36	14,8	3,1	0,0
SPD-40E	3	15	120	119,8	2,2	1,1	3,9	7	12,1	12,1	1,0
SPD-40F	0	8	122	31,9	0,6	0,0	0,7	28	21,4	0,8	0,5
SPD-40G	0	12	86	71,9	0,5	0,0	1,5	49	34,0	0,9	0,0
SPD-41B	1	35	153	335,4	0,7	0,7	0,7	86	78,2	3,2	0,7
SPD-41C	0	20	162	191,7	0,8	0,0	1,9	110	46,8	2,7	0,9
SPD-41D	0	9	181	119,8	0,4	0,0	0,4	5	44,3	0,9	0,0
SPD-41E	0	17	171	95,8	0,0	0,0	0,6	27	32,9	1,6	0,0
SPD-41F	1	15	156	103,8	0,0	0,0	0,9	67	35,9	2,0	0,0
SPD-41G	0	7	36	39,9	0,7	0,0	0,5	6	28,9	0,7	0,0

ANEXO II: Composição química do perfil laterítico de Sapucaia em % peso (elementos maiores) e ppm para elementos-traço (continuação).

Amostras	Rb	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Sb	Cs	Ba	La	Ce
SPD-7A	0,4	117,9	425,9	27,7	1,6	3	0,1	0,0	687	72,3	178,1
SPD-7B	2,1	119,8	642,2	38,9	1,7	5	0,7	0,2	739	84,6	211,9
SPD-7C	12,3	61,2	310,5	11,3	3,4	2	0,3	0,3	583	36,1	67,9
SPD-7D	0,6	423,8	647,4	52,8	2,1	6	0,3	0,0	930	46,8	81,5
SPD-7E	0,2	132,4	248,7	16,2	0,5	2	0,0	0,0	330	52,0	94,8
SPD-7F	0,3	130,8	579,0	25,6	0,0	3	0,0	0,0	426	78,5	149,8
SPD-7G	1,6	96,0	193,2	8,5	4,3	2	0,6	0,0	714	31,2	61,4
SPD11-A	2,0	92,7	389,1	25,1	0,8	2	0,1	0,5	543	52,5	120,0
SPD11-B	0,9	99,8	461,4	44,3	1,4	4	0,3	0,0	603	26,2	48,5
SPD11-C	4,2	5,9	44,9	4,6	0,0	0	0,0	0,0	349	11,4	18,3
SPD11-D	5,4	28,5	685,5	12,6	0,0	0	0,0	0,2	82	12,8	18,7
SPD17-A	1,5	57,0	844,1	38,8	0,5	3	0,1	0,3	432	45,5	94,8
SPD17-B	1,8	84,6	457,5	21,7	0,3	2	0,0	0,1	820	154,4	298,4
SPD17-C	2,5	66,7	227,9	19,3	0,2	1	0,0	0,0	1019	114,1	220,9
SPD17-D	1,5	39,7	99,5	8,8	0,2	0	0,0	0,0	640	52,6	100,3
SPD17-E	26,4	8,7	257,3	10,9	0,0	1	0,0	0,6	240	30,1	77,2
SPD-24A	0,3	21,9	103,5	5,2	0,5	1	0,2	0,0	265	42,0	77,1
SPD-24B	0,3	31,5	111,8	3,1	0,8	0	0,4	0,0	269	21,4	42,8
SPD-24C	1,8	55,1	194,5	8,8	0,0	3	0,0	0,0	235	44,6	84,4
SPD-24D	0,6	126,2	42,7	7,5	0,1	0	0,0	0,0	299	39,3	70,3
SPD-28A	1,3	62,1	713,4	29,4	0,9	3	0,1	0,4	770	59,1	145,0
SPD-28B	1,7	65,1	677,4	28,5	1,0	4	0,0	0,5	634	63,3	156,4
SPD-28C	1,7	96,7	656,4	26,5	0,3	4	0,0	0,1	792	107,3	229,8
SPD-28D	1,9	66,9	581,0	29,6	0,0	4	0,0	0,0	825	111,7	236,4
SPD-28E	2,4	45,8	516,9	24,8	0,3	3	0,0	0,1	736	108,0	218,3
SPD-30A	9,0	53,8	413,7	17,1	0,0	2	0,0	0,8	323	46,9	97,1
SPD-30B	5,6	100,6	431,7	38,6	0,2	3	0,0	0,7	682	65,7	125,8
SPD-30C	1,1	42,1	98,6	7,3	0,4	0	0,1	0,1	225	29,2	54,1
SPD-30D	2,8	90,3	254,6	12,4	1,1	3	0,5	0,2	485	30,3	55,9
SPD-30E	7,5	7,3	222,4	5,9	0,0	0	0,0	0,2	92	12,0	19,3
SPD-40A	0,4	80,3	159,1	11,2	0,4	2	0,2	0,0	534	40,4	82,3
SPD-40B	0,9	19,1	40,8	7,7	0,4	1	0,2	0,1	382	41,6	88,9
SPD-40C	0,8	14,6	52,5	4,6	0,2	0	0,2	0,1	178	25,0	49,5
SPD-40D	6,9	91,0	913,8	16,3	0,2	3	0,0	0,6	484	46,2	100,6
SPD-40E	4,6	77,1	596,0	12,2	0,9	2	0,0	0,7	361	55,0	121,3
SPD-40F	0,5	43,4	132,3	4,9	0,2	0	0,0	0,0	273	17,6	35,5
SPD-40G	6,5	33,9	291,7	12,1	0,6	1	0,3	0,2	554	19,6	41,2
SPD-41B	0,8	119,0	565,3	38,4	0,4	4	0,2	0,1	646	53,0	93,3
SPD-41C	1,0	86,1	196,4	9,5	0,4	0	0,2	0,1	384	72,4	138,2
SPD-41D	1,0	43,9	44,2	8,3	0,2	0	0,1	0,0	600	123,3	237,1
SPD-41E	1,1	89,1	29,2	9,5	0,3	0	0,1	0,0	397	40,5	80,5
SPD-41F	2,5	70,0	26,8	10,7	0,4	0	0,1	0,0	712	85,6	180,8
SPD-41G	3,7	16,5	337,8	13,6	0,1	1	0,0	0,0	301	63,0	113,4

ANEXO II: Composição química do perfil laterítico de Sapucaia em % peso (elementos maiores) e ppm para elementos-traço (continuação).

Amostras	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
SPD-7A	19,58	78,2	16,22	3,94	19,46	3,79	23,87	5,09	12,61	1,75	9,31
SPD-7B	25,17	97,8	20,60	4,75	19,82	3,53	21,06	4,89	12,93	1,82	10,29
SPD-7C	6,67	21,5	3,46	0,98	2,99	0,49	3,77	1,47	5,63	0,92	6,11
SPD-7D	10,78	50,7	13,28	3,85	25,92	6,46	51,43	14,66	40,62	5,03	25,09
SPD-7E	10,68	36,8	6,15	1,50	7,08	1,40	11,73	4,23	13,78	1,81	9,05
SPD-7F	15,91	56,5	12,04	2,93	12,74	2,43	17,16	5,08	14,91	2,08	10,63
SPD-7G	6,45	24,7	3,98	0,96	3,43	0,61	4,68	1,91	8,47	1,55	10,67
SPD11-A	17,64	90,9	24,56	6,25	26,55	3,72	20,55	3,74	10,60	1,37	7,64
SPD11-B	5,79	25,1	7,49	2,40	16,13	2,88	19,04	4,08	11,38	1,56	8,73
SPD11-C	1,84	5,9	0,76	0,27	0,59	0,12	0,86	0,19	0,62	0,13	1,41
SPD11-D	2,00	7,1	1,34	0,41	1,66	0,45	3,94	1,03	3,08	0,54	3,86
SPD17-A	11,38	43,5	8,79	1,95	8,24	1,43	9,44	2,22	5,84	0,94	5,73
SPD17-B	33,77	127,7	22,46	5,41	17,69	2,06	11,76	2,58	8,89	1,30	7,69
SPD17-C	25,13	92,3	15,74	3,50	11,20	1,31	6,54	1,58	6,73	1,20	6,91
SPD17-D	10,20	33,8	4,91	1,31	3,63	0,52	3,33	0,80	3,76	0,78	5,91
SPD17-E	4,76	17,9	2,73	0,62	2,29	0,28	1,83	0,37	1,19	0,15	1,35
SPD-24A	7,63	23,0	3,57	1,07	2,77	0,39	2,07	0,57	2,13	0,43	2,77
SPD-24B	4,74	15,6	2,57	0,73	2,15	0,32	2,09	0,78	3,06	0,56	3,81
SPD-24C	8,37	33,2	5,36	1,41	4,50	0,62	3,49	1,06	4,71	0,95	7,16
SPD-24D	7,59	28,4	5,85	1,68	7,23	1,52	10,62	4,10	13,94	1,97	10,55
SPD-28A	17,66	68,3	13,84	3,10	13,39	2,11	10,85	2,35	6,51	0,96	5,90
SPD-28B	19,06	77,6	15,83	3,47	14,23	2,31	12,69	2,59	6,90	0,99	5,78
SPD-28C	28,54	126,2	27,26	6,46	26,91	4,18	21,80	4,43	11,13	1,55	8,05
SPD-28D	28,82	117,2	23,47	5,34	19,25	2,83	14,20	2,76	7,43	1,21	7,05
SPD-28E	24,66	90,7	18,56	4,29	16,40	2,26	10,79	2,15	5,07	0,76	4,62
SPD-30A	10,94	44,8	8,97	1,93	9,11	1,38	8,79	1,80	4,80	0,80	4,93
SPD-30B	14,42	51,8	10,34	2,49	12,30	2,25	13,84	3,58	9,73	1,50	8,99
SPD-30C	5,67	21,4	3,37	0,78	3,19	0,59	3,63	1,20	3,92	0,70	4,42
SPD-30D	5,90	20,7	3,63	1,07	5,33	1,19	9,35	2,90	8,39	1,25	7,23
SPD-30E	1,72	3,7	0,83	0,27	0,72	0,12	0,72	0,21	0,75	0,12	0,96
SPD-40A	7,57	26,2	4,75	1,24	4,78	0,87	6,84	2,18	8,58	1,47	9,10
SPD-40B	8,39	28,3	4,69	1,25	3,28	0,53	2,58	0,57	1,89	0,38	3,50
SPD-40C	5,18	17,4	2,59	0,67	1,77	0,27	1,41	0,32	1,34	0,35	2,78
SPD-40D	11,28	45,3	9,61	1,98	10,40	1,71	11,20	2,68	8,04	1,44	8,37
SPD-40E	13,81	55,7	11,21	2,35	12,17	1,96	12,81	3,30	7,56	0,90	4,35
SPD-40F	3,35	9,9	1,66	0,42	1,49	0,28	2,25	1,03	4,47	0,85	5,24
SPD-40G	4,48	17,1	2,97	0,71	2,94	0,56	3,38	0,97	3,31	0,67	5,29
SPD-41B	10,92	39,3	6,57	1,54	7,27	1,59	13,50	4,01	12,86	1,94	11,40
SPD-41C	15,87	57,0	8,80	1,89	6,45	1,08	7,77	2,37	9,18	1,36	8,16
SPD-41D	28,04	109,2	18,17	3,89	9,89	1,17	4,84	0,91	4,02	0,91	7,23
SPD-41E	8,23	28,3	4,72	1,14	3,35	0,52	4,26	1,83	8,55	1,36	7,74
SPD-41F	20,38	75,1	13,39	3,21	8,54	1,24	6,28	1,59	6,74	1,16	6,97
SPD-41G	13,70	47,0	8,61	1,93	5,88	0,89	3,98	0,67	1,76	0,28	2,08

ANEXO II: Composição química do perfil laterítico de Sapucaia em % peso (elementos maiores) e ppm para elementos-traço (continuação).

Amostras	Lu	Hf	Ta	W	Au	Hg	Pb	Bi	Th	U
SPD-7A	1,12	10,5	1,8	8,6	0,5	0,33	3,2	0,2	19,9	20,9
SPD-7B	1,27	17,5	2,8	29,5	0,0	0,39	3,5	0,2	22,3	19,1
SPD-7C	0,91	8,7	1,0	0,8	0,9	0,01	2,9	0,0	8,6	16,7
SPD-7D	2,95	16,6	3,2	8,5	0,0	0,60	4,1	0,3	33,2	30,6
SPD-7E	1,04	6,2	1,1	1,2	1,0	0,02	0,7	0,0	16,8	36,6
SPD-7F	1,44	14,0	1,9	1,5	2,0	0,06	1,6	0,1	21,3	22,9
SPD-7G	1,50	5,6	1,0	1,1	0,0	0,02	3,6	0,0	8,2	29,2
SPD11-A	0,92	9,2	1,5	3,9	6,0	0,18	1,4	0,0	17,9	23,5
SPD11-B	1,22	10,9	2,5	2,7	0,0	0,08	2,3	0,5	28,6	27,5
SPD11-C	0,26	0,2	0,3	0,7	0,0	0,00	0,2	0,0	5,6	5,0
SPD11-D	0,65	17,4	1,2	0,0	0,0	0,00	0,2	0,0	10,1	1,9
SPD17-A	0,77	22,5	2,6	4,0	0,0	0,09	5,2	0,2	21,7	12,8
SPD17-B	1,06	11,6	1,2	1,3	0,0	0,03	1,8	0,0	21,5	14,7
SPD17-C	0,98	4,8	1,3	1,2	0,0	0,03	0,8	0,0	17,3	14,0
SPD17-D	0,82	1,6	0,4	1,1	0,9	0,03	1,2	0,0	13,9	10,2
SPD17-E	0,19	6,7	0,9	1,5	0,0	0,00	0,5	0,0	8,4	1,5
SPD-24A	0,38	13,9	0,4	1,2	3,2	0,01	1,3	0,0	6,2	10,3
SPD-24B	0,62	3,2	0,2	0,6	3,1	0,01	1,8	0,0	4,7	16,3
SPD-24C	0,97	4,8	0,9	0,9	3,9	0,01	1,3	0,0	9,1	10,7
SPD-24D	1,33	1,3	0,2	1,2	1,7	0,01	0,7	0,0	12,7	23,5
SPD-28A	0,87	17,5	2,0	3,3	0,6	0,27	7,7	0,2	19,8	12,6
SPD-28B	0,89	19,0	2,0	18,8	1,4	0,17	5,3	0,2	18,1	11,8
SPD-28C	1,15	18,7	2,1	2,2	0,8	0,09	3,2	0,0	23,1	13,2
SPD-28D	1,00	16,6	2,1	2,5	1,6	0,07	1,7	0,0	23,2	12,5
SPD-28E	0,69	13,4	1,8	4,8	1,5	0,07	2,2	0,0	20,6	11,9
SPD-30A	0,65	10,3	3,6	2,6	1,1	0,05	8,2	0,0	10,9	10,9
SPD-30B	1,25	11,8	2,8	4,7	0,6	0,22	6,8	0,1	17,0	25,7
SPD-30C	0,67	3,4	0,5	1,3	0,8	0,13	2,3	0,0	9,0	13,0
SPD-30D	1,01	7,0	1,1	1,3	3,8	0,21	3,8	0,1	12,0	61,8
SPD-30E	0,20	6,3	0,5	1,1	0,0	0,00	0,8	0,0	6,1	2,2
SPD-40A	1,26	4,7	0,7	0,9	0,0	0,05	1,4	0,0	11,0	29,0
SPD-40B	0,70	0,0	0,4	0,0	0,0	0,03	1,9	0,0	10,5	18,9
SPD-40C	0,47	0,2	0,3	0,0	0,0	0,01	0,9	0,0	6,2	11,3
SPD-40D	0,91	21,7	1,4	7,2	0,8	0,01	9,9	0,0	11,6	6,9
SPD-40E	0,53	15,1	1,0	7,2	1,8	0,06	6,6	0,0	12,3	6,7
SPD-40F	0,80	3,9	0,3	0,6	0,9	0,00	0,2	0,0	5,0	8,9
SPD-40G	0,91	8,7	0,8	0,9	10,7	0,02	1,6	0,0	10,5	13,4
SPD-41B	1,47	15,4	2,5	2,4	0,0	0,03	2,6	0,3	34,1	23,4
SPD-41C	0,93	5,2	0,5	0,9	0,0	0,01	1,4	0,2	20,0	20,7
SPD-41D	0,97	0,6	0,1	1,0	8,0	0,01	0,3	0,2	17,8	7,2
SPD-41E	0,86	0,9	0,0	0,0	3,6	0,02	0,4	0,2	16,3	11,9
SPD-41F	0,86	0,2	0,0	0,0	3,5	0,01	1,8	0,3	15,0	21,1
SPD-41G	0,34	9,9	1,1	0,0	2,8	0,01	1,4	0,2	13,4	3,0