

NÚMERO 28

Brasília, novembro de 2025

ISSN: 2448-2242

DOI: <http://doi.org/10.29396/itcprm.2025.28>

OCORRÊNCIAS DE FOSFORITOS SEDIMENTARES NA FORMAÇÃO LONGÁ, GRUPO CANINDÉ, BORDA ORIENTAL DA BACIA DO PARNAÍBA

AUTORES

Paulo Roberto Rodrigues Benevides Filho¹ (paulo.benevides@sgb.gov.br)Elem Cristina dos Santos Lopes² (elem.lopes@sgb.gov.br)Carolina Reis¹ (carolina@sgb.gov.br)Serviço Geológico do Brasil – Superintendência de Salvador¹; Superintendência de Belém²;

ABSTRACT

This report presents a geochemical and petrographic characterization of phosphorites from the Longá Formation, Parnaíba Basin, Brazil. The analyzed samples display notably high concentrations of P_2O_5 (up to 26.02%), uranium (up to 1268 ppm), and rare earth elements (REEs), including heavy REEs such as Dy (up to 259 ppm), Er (281 ppm), Yb (392 ppm), and Y (up to 2188 ppm). When compared to global deposits such as sedimentary sources (Phosphoria Formation, Alum Shale), and ion-adsorption clays from southern China, the Longá Formation samples show competitive – and in some cases superior – metal grades. These results indicate a sedimentary-chemical depositional setting with economic potential for phosphate, uranium, and HREEs exploration.

Keywords: Phosphate; phosphorite; uranium; rare earth elements

RESUMO

Este relatório apresenta uma caracterização geoquímica e petrográfica dos fosforitos da Formação Longá, Bacia do Parnaíba, Brasil. As amostras analisadas exibem concentrações notavelmente elevadas de P_2O_5 (até 26,02%), urânio (até 1268 ppm) e elementos terras-raras (ETR), incluindo ETR pesados como Dy (até 259 ppm), Er (281 ppm), Yb (392 ppm) e Y (até 2188 ppm). Quando comparadas com depósitos globais – como fontes sedimentares (Formação Phosphoria, Alum Shale) e argilas de adsorção iônica do sul da China – as amostras da Formação Longá apresentam teores de metais competitivos, em alguns casos até superiores. Esses resultados indicam um ambiente sedimentar-químico com potencial econômico para a exploração de fosfato, urânio e ETR pesados (HREE).

Palavras-chave: Fosfato; fosforito; urânio; elementos terras raras

1. INTRODUÇÃO

O projeto “Geologia e Potencial Mineral da Borda Oriental da Bacia do Parnaíba” tem como objetivo a realização do mapeamento geológico sistemático e da pesquisa de recursos minerais em cinco folhas cartográficas na escala 1:250.000, abrangendo a borda leste da Bacia do Parnaíba (Figura 1). Classificada como uma bacia intracratônica, a Bacia do Parnaíba localiza-se nas regiões Nordeste e Norte do Brasil, apresentando um preenchimento sedimentar predominantemente paleozoico. É reconhecida como uma das maiores bacias interiores do país (Vaz *et al.*, 2007).

Este informe apresenta a caracterização de uma ocorrência inédita de fosfato, descoberta a partir de uma anomalia radiométrica detectada durante o mapeamento da Folha Crateús. A anomalia foi identificada por meio de um gamaespectrômetro portátil e corresponde a um afloramento da Formação Longá, composto por folhelho siltoso, quartzarenito muito fino e fosforito. Esse afloramento está localizado na Fazenda Serra Negra, município de Santa Cruz dos Milagres, no Piauí (estação 4516-CR-039 - Figura 1).

A identificação dessa ocorrência é extremamente relevante, pois amplia o conhecimento sobre o potencial fosfático da região.

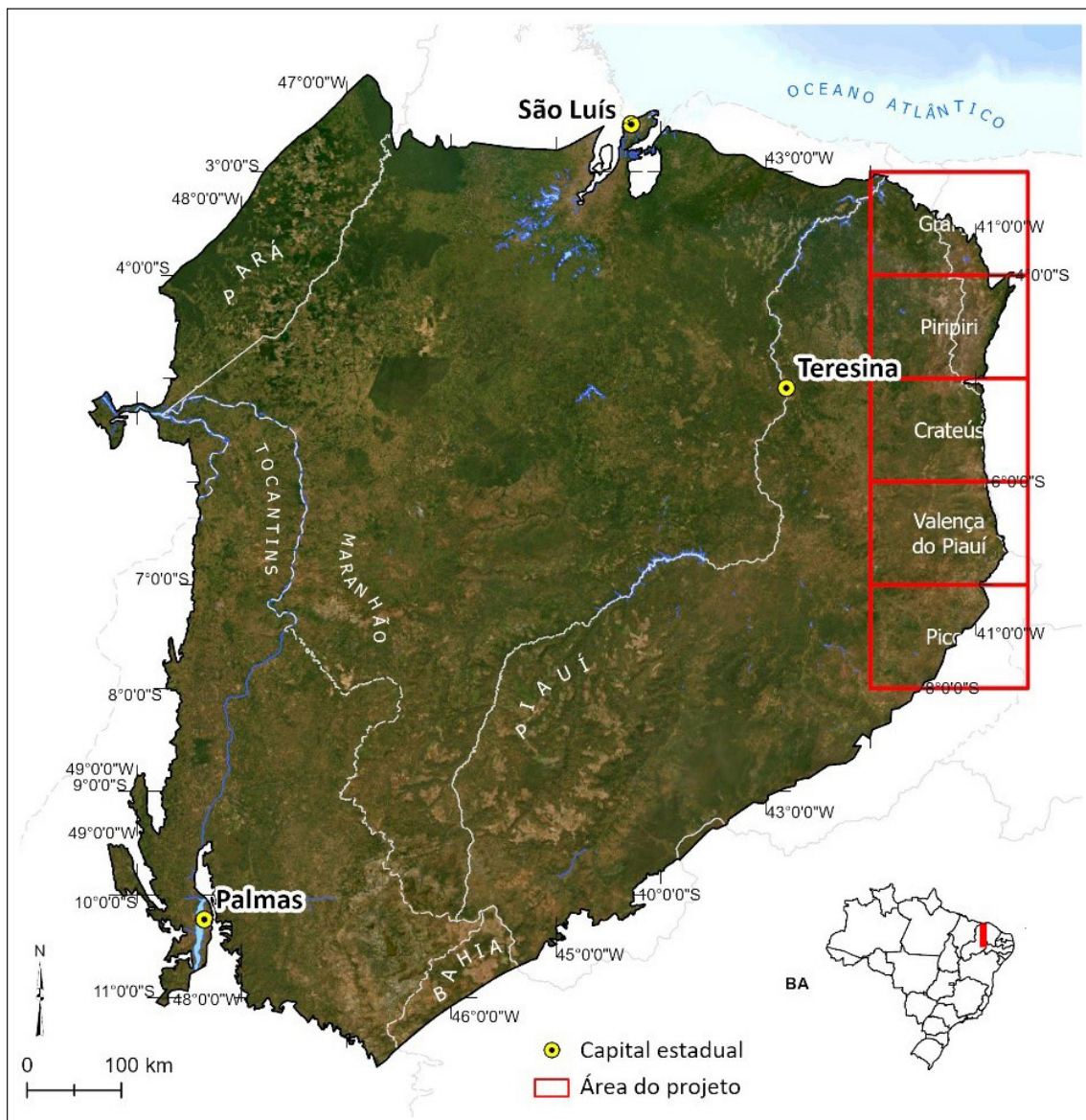


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, compreendida pelas folhas topográficas Granja, Piripiri, Crateús, Valença do Piauí e Picos, na escala 1:250.000. Fonte: ESRI (2025)

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia do Parnaíba abrange uma área de aproximadamente 600.000 km² e apresenta um preenchimento sedimentar que se estende

desde o embasamento pré-cambriano até depósitos meso-cenozoicos (Figura 2). Seu arcabouço estratigráfico paleozoico é subdividido nos grupos Serra Grande (Siluriano), Canindé (Devoniano-Carbonífero) e Balsas (Carboní-

fero-Triássico), sobrepostos por rochas ígneas do Grupo Mearim (Jurássico-Cretáceo) e por depósitos cretáceos das formações Codó, Grajaú e Itapecuru (Góes; Feijó, 1994).

O Grupo Canindé, de grande importância econômica e paleoambiental, corresponde a uma sequência transgressivo-regressiva depositada sobre o Siluriano e inclui as formações Itaim, Pimenteira, Cabeças, Longá e Poti (Caputo, 1984).

A *Formação Longá*, de idade Devoniana Superior (Famenniano), é composta predominantemente por folhelhos silto-argilosos cinza-escuros a negros, finamente laminados e com níveis bioturbados, associados a intercalações subordinadas de siltitos e arenitos muito finos. Esses depósitos registram sedimentação em uma plataforma marinha de baixa energia, com influência episódica de tempestades (tempestitos) durante o

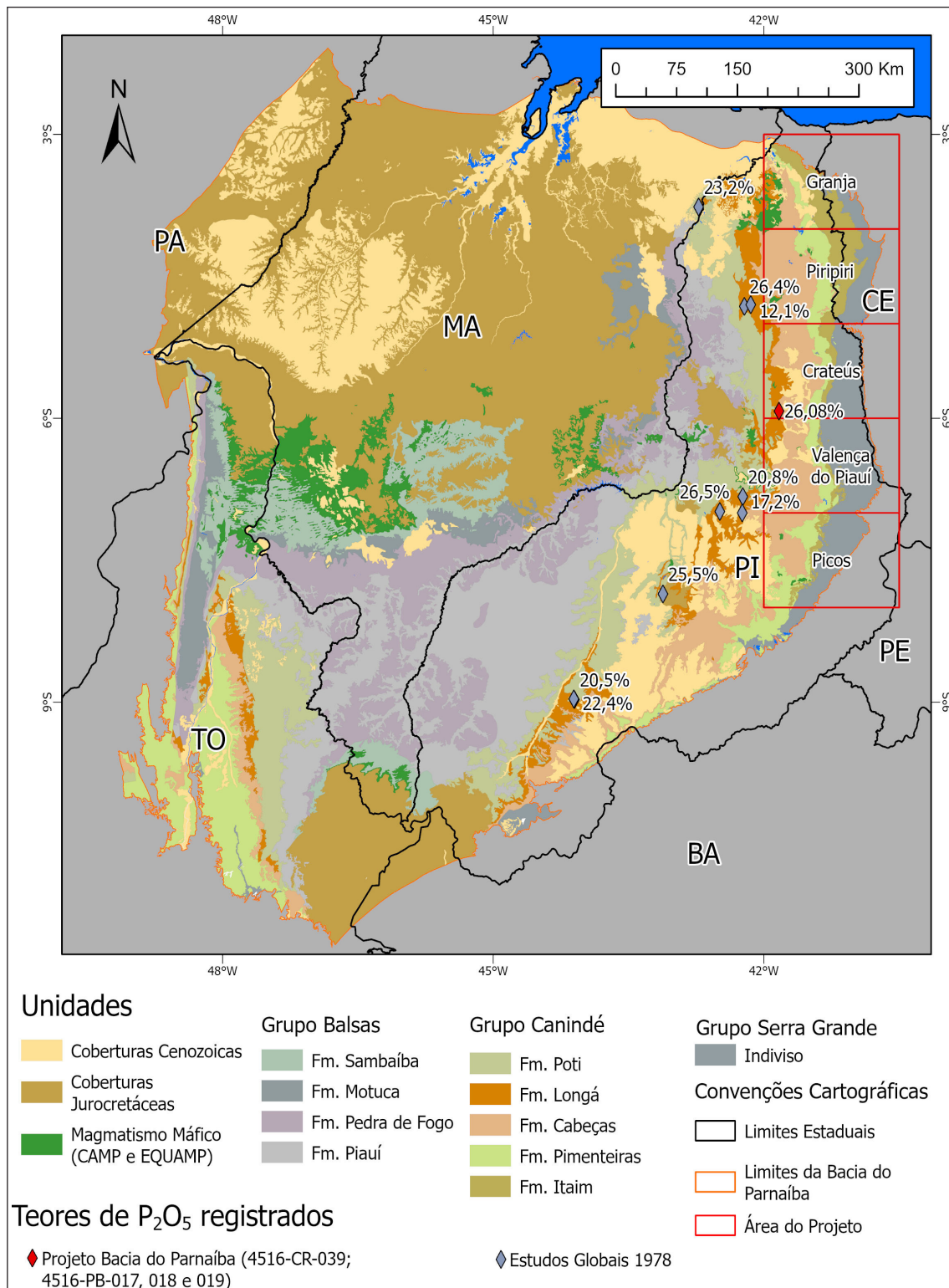


Figura 2 – Mapa simplificado da Bacia do Parnaíba, destacando a localização da área do projeto e os teores de P₂O₅ identificados. Fonte: Modificado de CPRM (2004)

máximo transgressivo paleozoico (Rodrigues, 1995). Estratigraficamente, a Formação Longá recobre os arenitos transicionais, diamictitos e pelitos glaciais da Formação Cabeças, é sobreposta discordantemente pela Formação Poti, e marca o encerramento do Devoniano na bacia (Góes; Feijó, 1994).

No contexto estratigráfico da Bacia do Paranaíba, a Formação Longá se destaca pelo reconhecido potencial para mineralizações fosfáticas. A unidade registra níveis fosforíticos associados a condições paleoambientais de plataforma marinha com baixo aporte terrígeno e eventos anóxicos regionais durante o Devoniano Superior (Famenniano-Tournaisiano) (Lima; Leite, 1978). Tais condições favorecem a precipitação de fosfatos autigênicos em níveis condensados, comumente associados a fósforo, urânio e elementos terras-raras (ETRs) em ambientes epicontinentais restritos (Emsbo *et al.*, 2015).

3. METODOLOGIA

Durante o mapeamento geológico na área de estudo, utilizou-se um gamaespectrômetro portátil operado a partir do veículo, principalmente em estradas vicinais sem revestimento asfáltico, o que possibilitou a identificação e a caracterização de diversas anomalias radiométricas. A partir desses resultados, elaborou-se um perfil estratigráfico detalhado, no qual foram realizadas medidas sistemáticas com gamaespectrômetro portátil e coleta de amostras representativas das três litofácies aflorantes na estação.

Nas estações 4516-CR-039; 4516-PB-017; 4516-PB-018 e 4516-PB-019 (Figura 2) foram coletadas nove amostras para a caracterização mineralógica, textural e química. A análise petrográfica foi realizada em lâminas delgadas com microscópio óptico Olympus BX-51, com luz transmitida, utilizando ampliações de 20x, 40x, 100x, 200x e 400x.

As análises químicas de rocha foram realizadas pela SGS Geosol, abrangendo elementos maiores, menores, traços e voláteis com afinidade com Au e metais-base. Os óxidos maiores e parâmetros associados foram determinados por Fluorescência de Raios X (FRX), após fusão com tetraborato de lítio (método XRF79C), abrangendo as concentrações de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃(t), CaO, MgO, TiO₂, P₂O₅, Na₂O, K₂O, MnO, além de BaO, Cr₂O₃, SrO, NiO. Também foram reportadas a soma total dos óxidos (SOMA) e a perda ao fogo (LOI). Os elementos-traço voláteis com afinidade por Au foram quan-

tificados por meio da digestão em água-ré-gia seguida da leitura por ICP-OES/ICP-MS (método ICM14B), abrangendo As, Bi, Ge, Hg, In, Re, Sb, Se, Te e Tl. Já os metais-base e elementos associados foram analisados por digestão em quatro ácidos e leitura por ICP-OES/ICP-MS (método ICM40B), cobrindo Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, P, Pb, Sc e Zn. Um conjunto adicional de elementos-traço, Ba, Cr, Sr, V e Zr, foi determinado por ICP-OES (método ICP95A). Por fim, os elementos terras-raras e refratários foram analisados após fusão com metaborato de lítio e leitura por ICP-OES/ICP-MS (método IMS95A), incluindo Ce, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Ta, Tb, Th, Tm, U, W, Y e Yb.

Na amostra 4516-CR-R-039C, realizou-se análise detalhada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com equipamento Zeiss LS15, no Laboratório Lamin do SGB-CPRM, em Belém. As análises foram conduzidas em modo de alto vácuo (< 3,0 10⁻⁵ mPa), com filamento de tungstênio. As lâminas delgadas polidas foram previamente metalizadas com uma película de cromo (20 µm) e analisadas sob as mesmas condições de vácuo. As imagens foram obtidas por elétrons retroespalhados (Backscattered Eletrons - BSE), e a composição química dos minerais foi determinada por espectrometria por dispersão de energia (Energy Dispersive Spectrometry - EDS), utilizando um detector X-Act SSD 10 mm², da Oxford Instruments. Foram analisados 13 campos distribuídos em 3 lâminas da amostra, resultando em mapas de BSE, perfis composicionais e mais de trezentas análises pontuais.

O processamento e padronização dos dados foram realizados no software AZtec (Oxford Instruments). A classificação mineral baseou-se na composição elementar e nas fórmulas estruturais, utilizando como referência a base de dados do Mineralogy Database.

Para confirmar os resultados anômalos obtidos na estação 4516-CR-039, coletaram-se amostras adicionais nas estações 4516-PB-017, 4516-PB-018 e 4516-PB-019, analisadas por Difractometria de Raios X (DRX). As análises de DRX foram realizadas no Lamin do SGB-CPRM, em Manaus. As análises foram realizadas em Difractômetro Panalytical X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), com goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta), tubo de raios X cerâmico de ânodo de cobre (Cu Kα1 = 1,5406 Å), modelo PW3373/00, de foco fino longo (2200W, 60kv). O detector RTMS, Pixel/1D

foi utilizado para aquisição dos dados, feito com o software X'Pert Data Collector (v2.1^a), e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore (v3.0d), também da Panalytical. As condições analíticas utilizadas foram: Voltage (kV): 40; Current (mA): 40; Scan range ($^{\circ}$ 2 θ): 5-70 (MA) e 5-50 (RJ); Step size ($^{\circ}$ 2 θ): 0,02; Scan mode: Continuous; Counting time (s): 50; Divergence slit: Slit Fixed 1/2 $^{\circ}$; Mask Fixed 10 mm; Anti-scatter slit Name: 5,7 mm. A identificação mineralógica baseou-se na comparação dos difratogramas obtidos com os padrões do International Center for Diffraction Data - Powder Diffraction File (ICDD-PDF).

Este relatório contou com o apoio da ferramenta ChatGPT (OpenAI, versão março de 2025), utilizada como recurso auxiliar na organização de dados, elaboração de gráficos, sugestões de redação e apoio na comparação com informações provenientes da literatura científica. Ressalta-se que todas as interpretações, análises técnicas e conclusões apresentadas são de responsabilidade exclusiva dos autores.

4. RESULTADOS

4.1. Descrição das ocorrências

A estação 4516-CR-039 (Figura 3) corresponde a um afloramento exposto no leito de uma estrada ravinada, localizado ao longo de uma ladeira, com extensão horizontal aproximada de 150 metros e espessura vertical de aproximadamente 3,20 metros. As rochas identificadas correspondem a uma sucessão de heterolitos e quartzarenitos, com fosforito radioativo intercalado (Figura 3).

Os níveis heterolíticos da amostra 4516-CR-R-039A são compostos por folhelhos siltos-argilosos cinza com lâminas de areia muito fina, de coloração lilás. Aparecem em camadas tabulares de espessura variando entre 20 a 80 cm, exibindo laminações onduladas, cruzadas e plano-paralelas, frequentemente bioturbadas.

O quartzarenito (4516-CR-R-039B) apresenta granulação muito fina, cor cinza-claro, matriz argilosa e lâminas ocasionais de argila castanha, que evidenciam laminações cruzadas, marcas de onda e bioturbações em alguns horizontes. Ocorre em camadas tabulares, com espessura variando entre 10 e 50 cm.

O nível de fosforito (4516-CR-R-039C) é pelítico, de coloração castanho-escuro, marcado por laminações plano-paralelas discretas.

Esse horizonte, com cerca de 15 cm de espessura, apresenta os mais altos níveis de radiação gama do conjunto analisado (Figura 3).

Em uma segunda fase do levantamento de campo, com o apoio de um gamaespectrômetro portátil, foram identificados outros afloramentos contendo litofácies com alta radiação, semelhantes às encontradas na estação 4516-CR-039. Com base nessas observações, foi possível delinear uma superfície geomorfológica característica associada a essas ocorrências (Figura 4). Rochas com elevados níveis de radiação e características litológicas semelhantes às da estação 4516-CR-039 foram descritas e amostradas nos pontos 4516-CR-039, 4516-PB-017, 4516-PB-018 e 4516-PB-019, distribuídos em um raio de até 2,5 km.

Na estação 4516-CR-039 uma segunda amostra desse mesmo nível radioativo foi coletada e denominada 4516-CR-R-039D.

Na estação 4516-PB-017, aflora um nível de siltito argiloso de coloração cinza-arroxeadado, com cerca de 1 metro de espessura até a base de afloramento. Esse nível é sobreposto por um pacote de aproximadamente 50 cm de espessura, composto por siltito roxo escuro (Figura 5A), com laminação plano-paralela e cruzada de baixo ângulo. O siltito roxo escuro apresentou altos teores de radioatividade e foi amostrado (4516-PB R-017).

Na estação 4516-PB-018, foi descrito um perfil parcialmente encoberto em encosta com aproximadamente 7 metros de altura (Figura 5B). Na base, aflora cerca de 1,5 metro de siltito arenoso cinza-arroxeadado a esverdeado, com laminação plano-paralela. Aproximadamente 3 metros acima, sob fina camada de solo, ocorrem pelitos marrom-escuros, macroscopicamente semelhantes ao fosforito (4516-CR-R-039C), apresentando alta radioatividade (Figura 5C). Essa camada anômala apresenta aproximadamente 50 cm de espessura (4516-PB-R-018B). Cerca de 2 metros acima, aflora novamente um arenito fino arroxeadado, com cerca de 1 metro de espessura, sem radioatividade significativa. No topo do platô, observam-se blocos decimétricos de siltito cinza-arroxeadado a esverdeado, com alta radioatividade (4516-PB-R-018C).

Na estação 4516-PB-019, localizada em uma encosta, aflora rocha siltítica intensamente intemperizada, de coloração roxo-escuro e com laminação plano-paralela (Figura 5D). Essa rocha apresenta valores elevados de radioatividade registrados em campo. Aproximadamente 1 metro abaixo, no regolito, a radioatividade já não indicava anomalia significativa (4516-PB-R-019).

A pesquisa nas imediações da primeira ocorrência (4516-CR-039) reforça a hipótese inicial de tratar-se de um nível fosforítico pouco espesso (inferior a 1 metro). Com base nas observações de campo, constatou-se que o aspecto das rochas, a respos-

ta gamaespectrométrica, e os teores anômalos de fósforo apresentaram variações abruptas no registro estratigráfico, estando os valores elevados de fósforo e radioatividade restritos a esses horizontes fosfáticos (fosforitos).

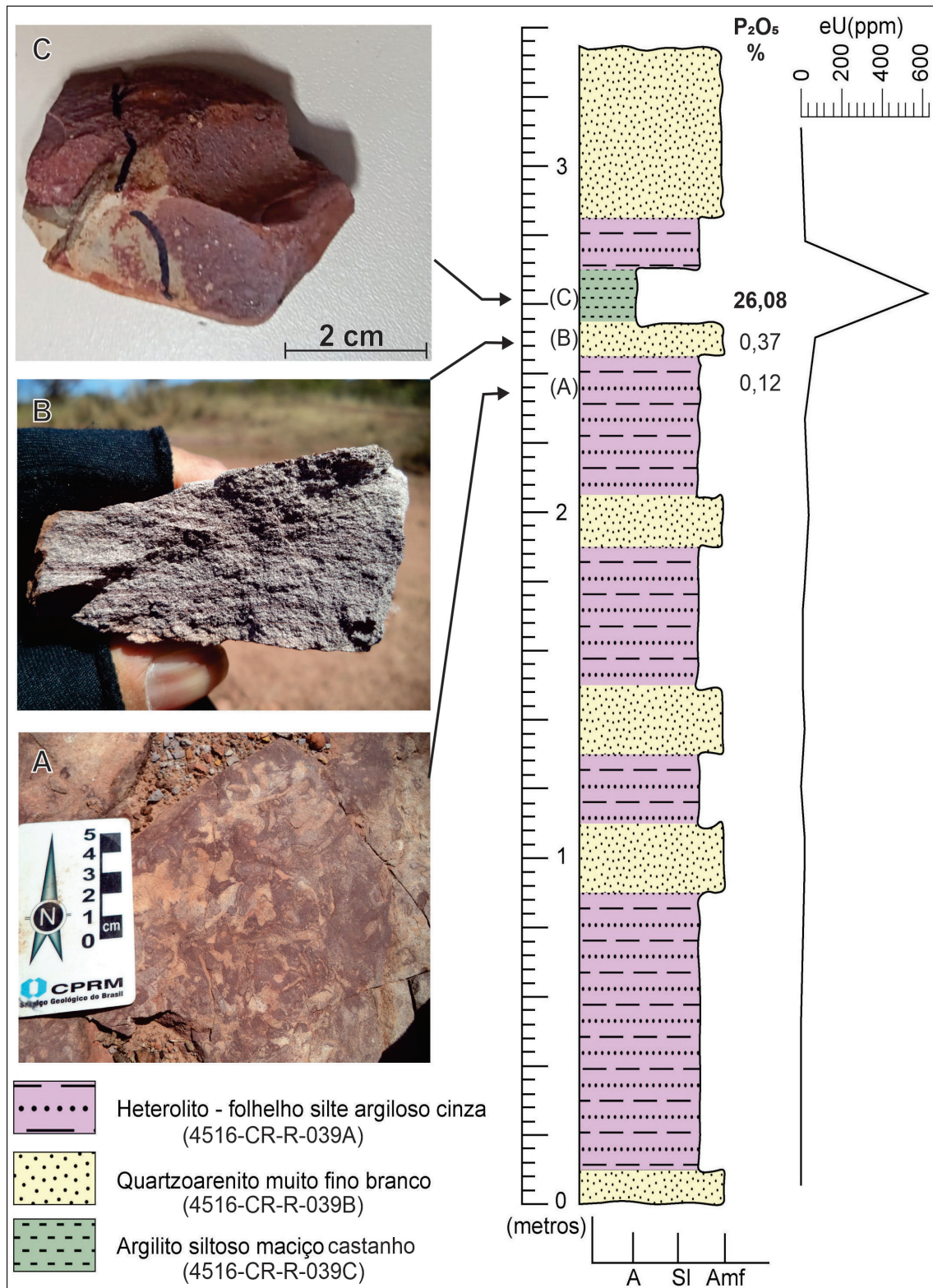


Figura 3 – Perfil estratigráfico esquemático da estação 4516-CR-039 da Formação Longá. Análises com gamaespectrômetro foram realizadas a cada 50 cm. Heterolito com variações granulométricas de areia fina a argila, além de marcas de ondas e registros de bioturbação (A); Amostra de mão do quartzarenito muito fino (B); Amostra de mão do fosforito pelítico mostrando estratificação incipiente (C). Fonte: Elaborada pelos autores.

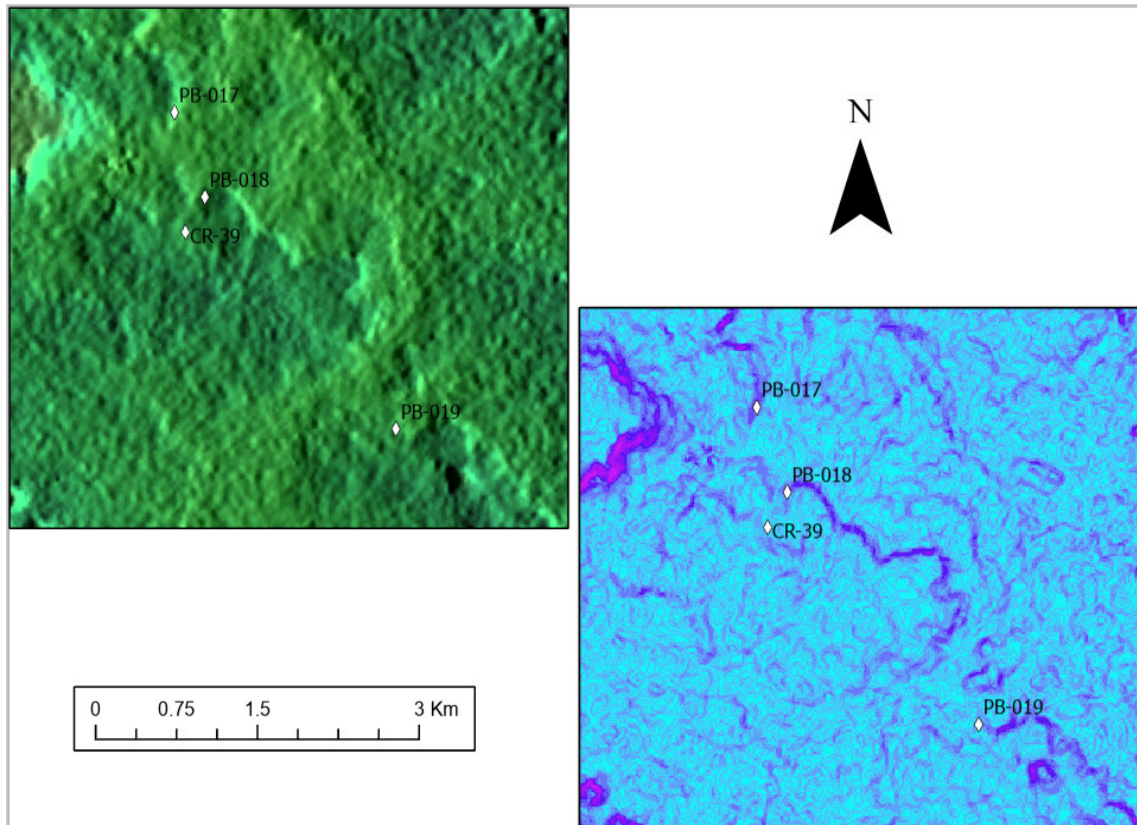


Figura 4 – Imagens de relevo e declividade geradas a partir dos dados ALOS-PALSAR, destacando o horizonte onde ocorre o nível fosforítico aflorante. Fonte: JAXA; NASA (2025)



Figura 5 – (A) Nível radioativo formando degrau em encosta de morrote, estação PB-017; (B) Vertente de morro, estação PB-018, no qual foi identificado pelito (fosforito) marrom aflorando centímetros abaixo do solo; (C) Amostra PB-018B, coletada no ponto da foto anterior; (D) Lajedo discreto de rocha radioativa em PB-019. Fonte: Elaborada pelos autores.

As rochas aflorantes dos perfis, associados ao nível fosfático correspondem a siltitos e arenitos finos cinza-arroxeados, semelhantes aos descritos no perfil em 4516-CR-039. Entre as estações há uma distância aproximada de 3 km, ao longo da qual esse nível aflora de forma praticamente contínua, podendo inclusive ser reconhecido em imagens de satélite (Figura 6). Destaca-se ainda a presença de vegetação mais densa nas áreas onde os fosforitos afloram.

Dessa forma, embora pouco espesso, o nível fosfático apresenta grande potencial de continuidade lateral e, considerando sua disposição planar, pode projetar-se em subsuperfície, mergulhando para oeste, seguindo o mergulho regional da borda leste da Bacia do Parnaíba. Além disso, a presença dos fragmentos decimétricos de siltito radioativo no topo do perfil na estação 4516-PB-018 constitui indício adicional da existência de outros níveis mineralizados, que podem ter sido fonte desse material.



Figura 6 – Imagem de satélite onde é possível observar a diferença de vegetação sobre o nível fosforítico. Fonte: ESRI (2025)

4.2. Caracterização petrográfica e química

A amostra 4516-CR-R-039C apresenta uma textura levemente laminada e matriz microcristalina de coloração castanho-escuro, com aspecto geral oxidado. Observam-se pequenos grãos translúcidos e opacos dispersos em uma matriz predominantemente microcristalina, de baixa birrefringência – quase extinta sob nicóis cruzados, características compatíveis com a colofana. Os grãos translúcidos correspondem predominantemente a quartzo e feldspatos de origem terrígena.

Destacam-se zonas com halos concêntricos (Figura 7A), às vezes com núcleos de aspecto concrecionário e forma arredondada, de aproximadamente 1 mm de diâmetro, disseminados de forma irregular na matriz (Figura 7B).

O mesmo nível fosforítico foi amostrado posteriormente e está representado na amostra 4516-CR-R-039D. Essa segunda amostra não apresentou as concreções uraníferas e aparenta um menor grau de alteração intemperica, além de uma textura mais grossa (Figuras 7C e D).

A partir dos mapas de BSE, observou-se que as maiores concentrações de cálcio (Ca) e fósforo (P) ocorrem disseminadas na matriz microcristalina. Por outro lado, nas estruturas de aspecto concrecionário, os teores desses elementos são menores ou até ausentes (Figura 8A). As análises pontuais também evidenciaram uma relação de proporção Ca/P consistente, variando entre 2,1 e 2,4, entre os teores desses dois elementos, em uma proporção de valores próximos ao da francolita, cuja razão Ca/P é 2,59 (*Mineralogy Database*).

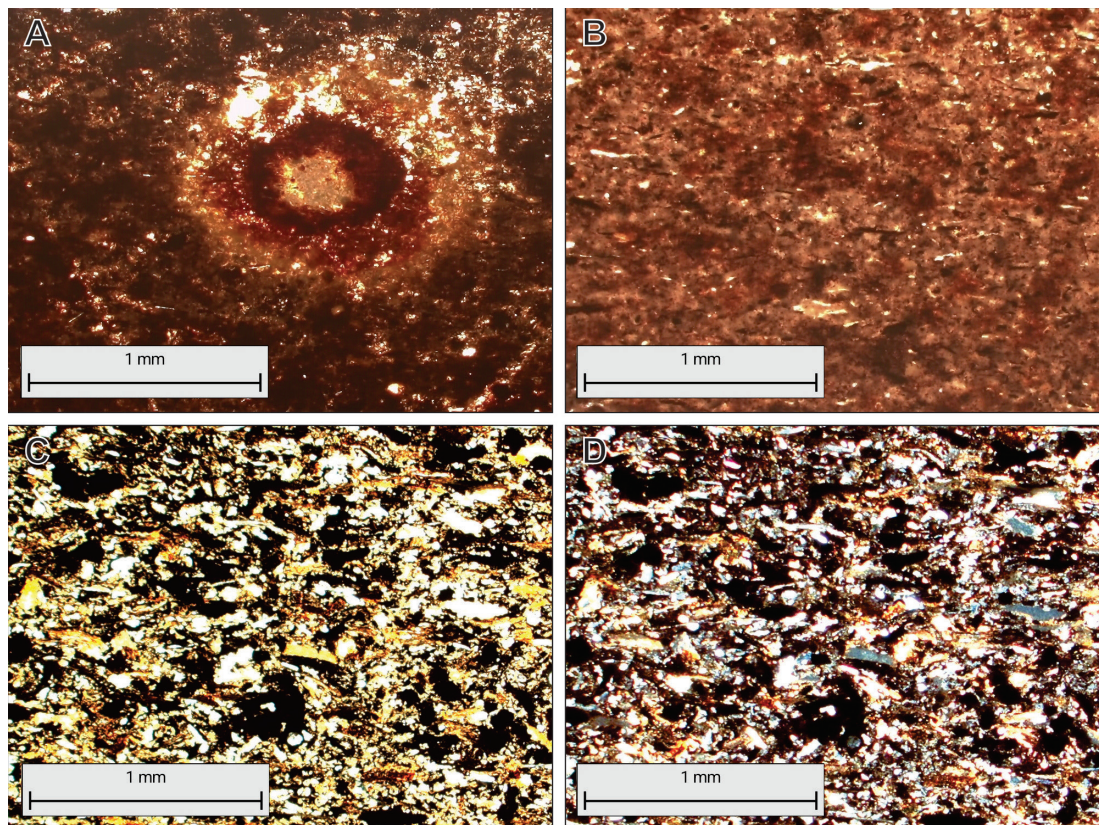


Figura 7 – Fotomicrografias do nível fosforítico em 4516-CR-039: (A) Concreção arredondada com halo reativo concêntrico (4516-CR-R-039C); (B) Detalhe da matriz microcristalina de colofana (4516-CR-R-039C). Nova amostra coletada no mesmo nível fosforítico (4516-CR-R-039D), sob luz plano-polarizada (C) e com polarizadores cruzados (D)
Fonte: Elaborada pelos autores.

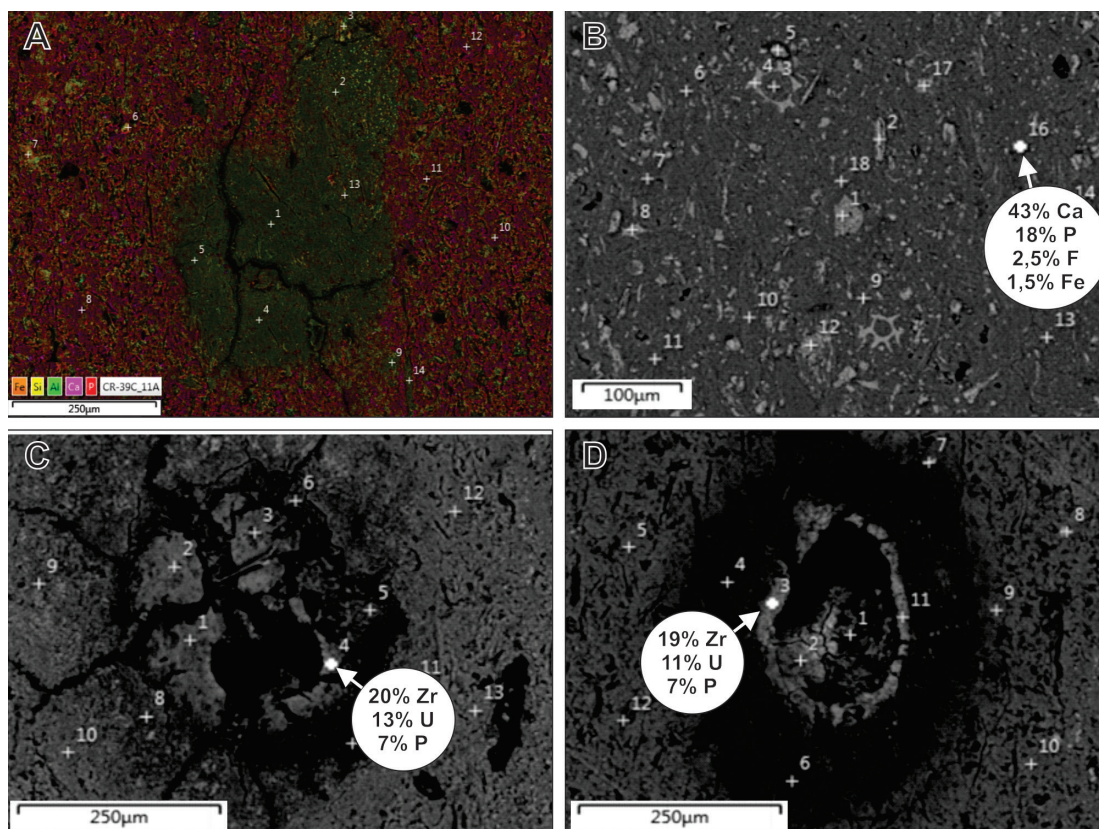


Figura 8 – Análise por MEV do fosforito (4516-CR-R-039C): (A) Mapa de BSE do campo 11A mostrando concentrações mais altas de P e Ca na matriz do que na estrutura concrecional, no centro da foto, destacada pela coloração verde-musgo; (B) Teores de elementos do ponto 16 do campo 12A, investigado na matriz, com composição próxima à da colofana; (C) Teores de elementos do ponto 4 do campo 13A investigado em uma concreção, com quase 13% de urânio (U); (D) Teores de elementos do ponto 3 do campo 14, também em uma concreção, com aproximadamente 11% de urânio (U). Fonte: Elaborada pelos autores.

Outro dado relevante é a presença frequente de flúor (F), em teores entre 1 e 4%, nas análises que indicaram concentrações significativas de Ca e P, reforçando a identificação da fase mineral como francolita. Também foram registradas variações químicas pontuais, com teores reduzidos de Ca e P associados à presença de alumínio (Al) e silício (Si), indicando a presença de argilominerais silicáticos misturados à colofana em determinadas áreas da amostra.

Alguns pontos, contudo, apresentaram assinaturas químicas compatíveis com fases “puras” de francolita (Figura 8B). Nesses pontos, os teores de cálcio variam predominantemente entre 30 e 40%, acompanhados por fósforo entre 15% e 18%. Além da presença recorrente do flúor, detectou-se uma pequena quantidade de ferro, embora menos frequente.

Outros componentes minerais foram individualizados nas análises realizadas na matriz, incluindo grãos de zircões, K-feldspatos e óxidos de ferro, com ou sem teores detectáveis de titânio e arsênio, além de óxidos de ferro e alumínio. Alguns pontos da matriz microcristalina, onde o Si é predominante, apresentam assinaturas compatíveis com o argilomineiral glauconita, típico de ambientes marinhos fosfogênicos. Na maioria das análises, verificou-se uma mistura de silicatos aluminosos, óxidos e fosfatos, com teores intermediários.

Destaca-se ainda a presença de duas concreções com halos reativos, analisadas no MEV, nas quais foram detectados teores de até 12% de urânio (U), frequentemente associados a zircônio (Zr) em proporção aproximada de 2:1 (Zr:U) (Figuras 8C e 8D). Outros elementos identificados, embora com menor frequência, incluem platina (Pt), arsênio (As), irídio (Ir), bromo (Br), cromo (Cr) e itérbio (Yb).

O silito associado à estação 4516-PB-017 (Figuras 9A, B e C) é constituído predominantemente por uma matriz de óxidos opacos e calcita, que cimenta grãos detríticos de quartzo, predominantemente na fração areia fina a silte.

Nas amostras 4516-PB-R-018B (Figuras 10A e B) e 4516-PB-R-019 (Figuras 10C e D), onde foram registradas anomalias gamaespectrométricas, os litotipos apresentam características semelhantes, com laminações internas discretas e presença de grãos de óxidos com formatos e arranjos framboidais e ameboidais.

Um traço comum entre essas rochas e o fosforito em 4516-CR-R-039C e D é a predominância de uma matriz colofanítica, que

caracteriza as litofácies fosfatadas em todas as estações. O contraste entre o formato e o tamanho dos óxidos e a matriz sugere deposição por precipitação química/biológica dessa fase. Essa característica associada ao reduzido aporte detrítico, indica tratar-se de fosforitos do tipo *pristine*.

A amostra 4516-PB-R-018C (Figura 11), por sua vez, representa um litotipo retrabalhado, com características sedimentares e texturais distintas. A rocha exibe composição heterolítica, marcada pela intercalação de domínios fosfáticos colofaníticos (scfa), constituídos por grãos fosfáticos retrabalhados e recristalizados – e níveis milimétricos mais quartzosos, de origem detrítica (sdet), que exibem múltiplos truncamentos e arranjos característicos de marcas onduladas (Figura 11C).

A presença de estruturas interpretadas como bioturbação vertical (btur), associadas a marcas onduladas sugere um ambiente com maior energia e dinâmica deposicional, marcado por eventos de remobilização hidrodinâmica.

Diferentemente da matriz uniforme e quimicamente precipitada dos fosforitos *pristine*, a composição textural da 4516-PB-R-018C evidencia aportes detríticos mais significativos e reorganização dos materiais fosfatados, indicando tratar-se de um fosforito retrabalhado (tipo *reworked*) (Figura 11).

Os resultados das análises de Difração de Raios X (DRX) demonstraram que as amostras 4516-PB-R-018B; 018C e 019 são compostas majoritariamente por fluorapatita (colofana), além de quartzo, hematita, mica e argilominerais dos grupos da illita e da esmectita.

Já a amostra 4516-R-PB-017 (silito), apresentou o quartzo como fase mineral dominante, acompanhado de teores menores de ankerita/dolomita, thorianita/uraninita e colofana, além de hematita e plagioclásio (Figura 12).

Os resultados da química de rocha (Tabela 1) caracterizam fosforitos com teores de P_2O_5 de 17-26% e razões CaO/P_2O_5 próximas de 1,26-1,31, compatíveis com fluorapatita (colofana). Essa assinatura é corroborada por análises de DRX e EDS, que registram Ca e P associados à F e/ou Fe, com razões Ca/P em torno de 2,1-2,4 em porções livres de sílica.

A ausência de anomalias positivas de Eu nas amostras evidencia a predominância dos processos sedimentares/diagenéticos e pouca contribuição hidrotermal. Essas características explicam os altos $\Sigma ETRP$ e Y (até ~2190 ppm de Y) e a tendência de covariância entre P_2O_5 e ΣETR , típica de fosforitos marinhos (Gao *et al.*, 2023; Deng *et al.*, 2017).

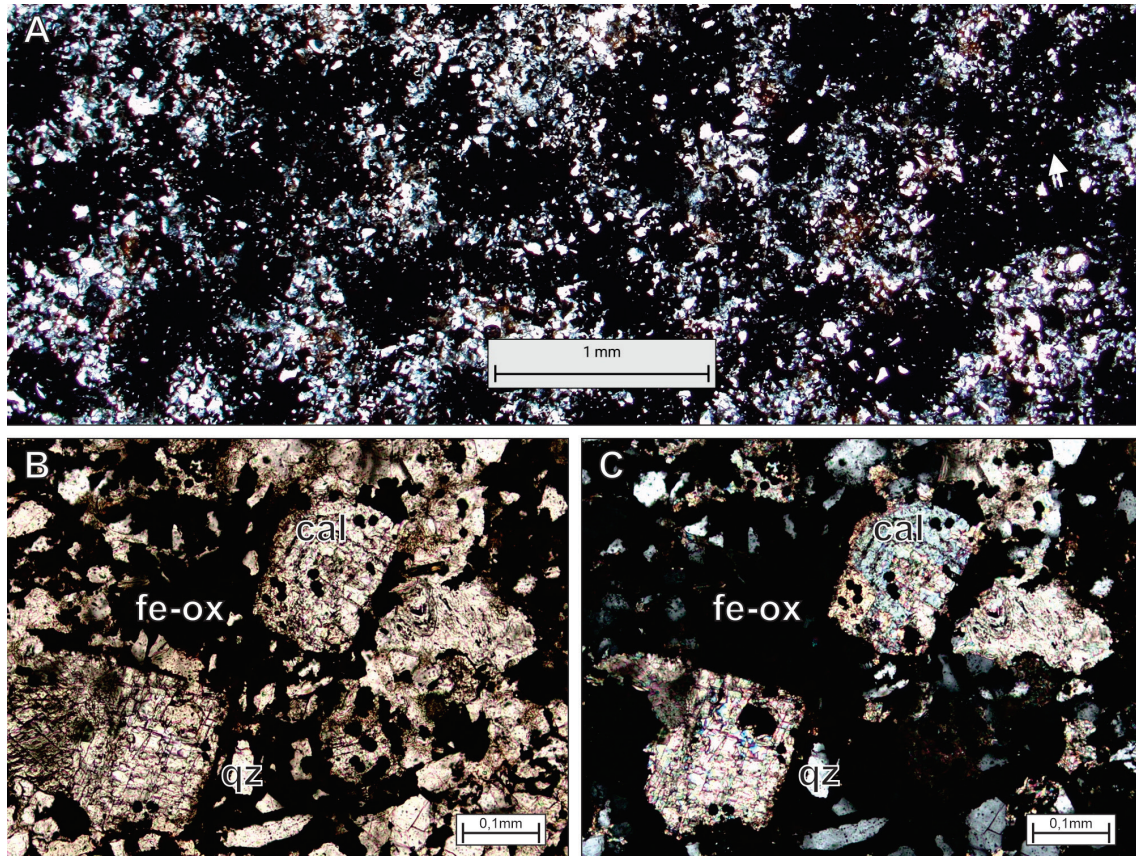


Figura 9 – Fotomicrografias da amostra PB-R-017 obtidas sob luz paralela com aumentos de 20x (A) e 100x sob luz paralela e com nicóis cruzados, respectivamente (B e C); fe-ox – óxidos de ferro opacos; cal – calcita; qz – quartzo. Fonte: Elaborada pelos autores.

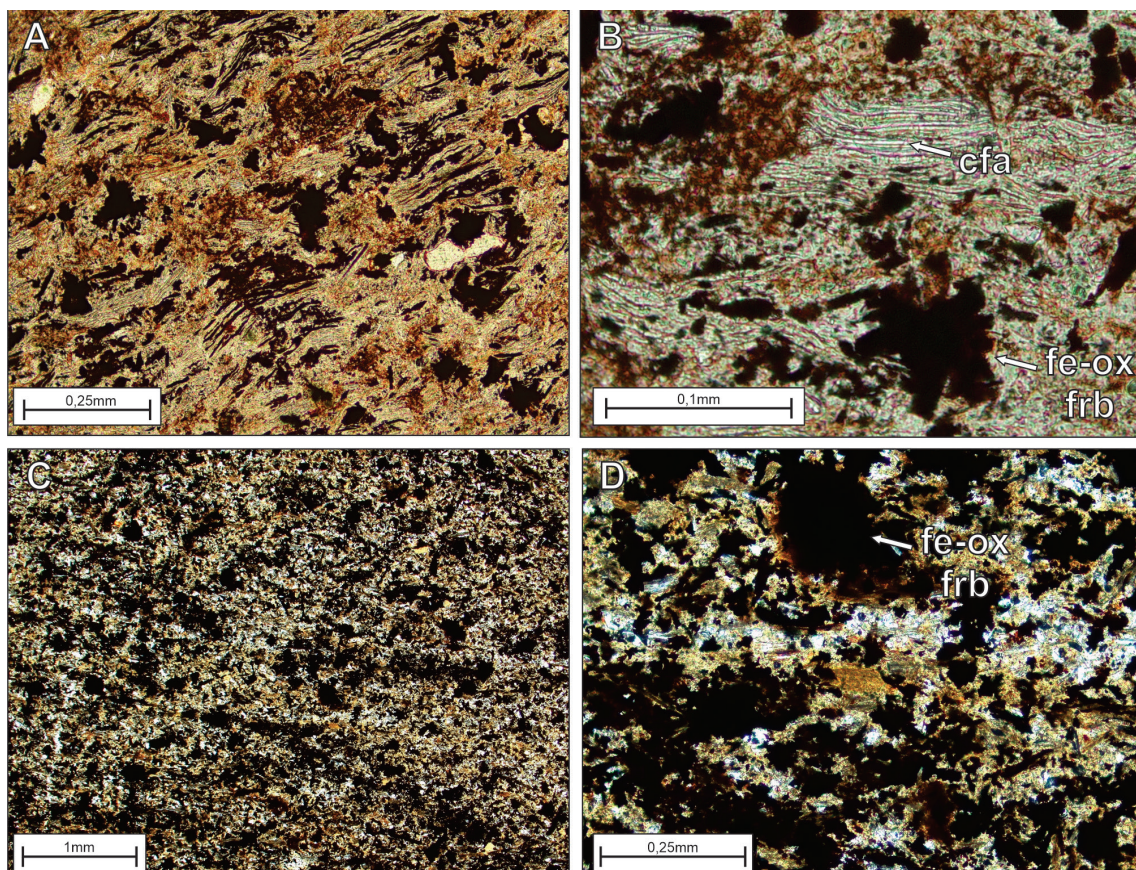


Figura 10 – Fotomicrografias das amostras PB-R-018B (A e B) e PB-R-019 (C e D), obtidas sob luz paralela com aumentos de 20x e 100x respectivamente; cfa – matriz colofanítica com textura de microbialito laminado; fe-ox frb – óxidos de ferro opacos framboidais. Fonte: Elaborada pelos autores.

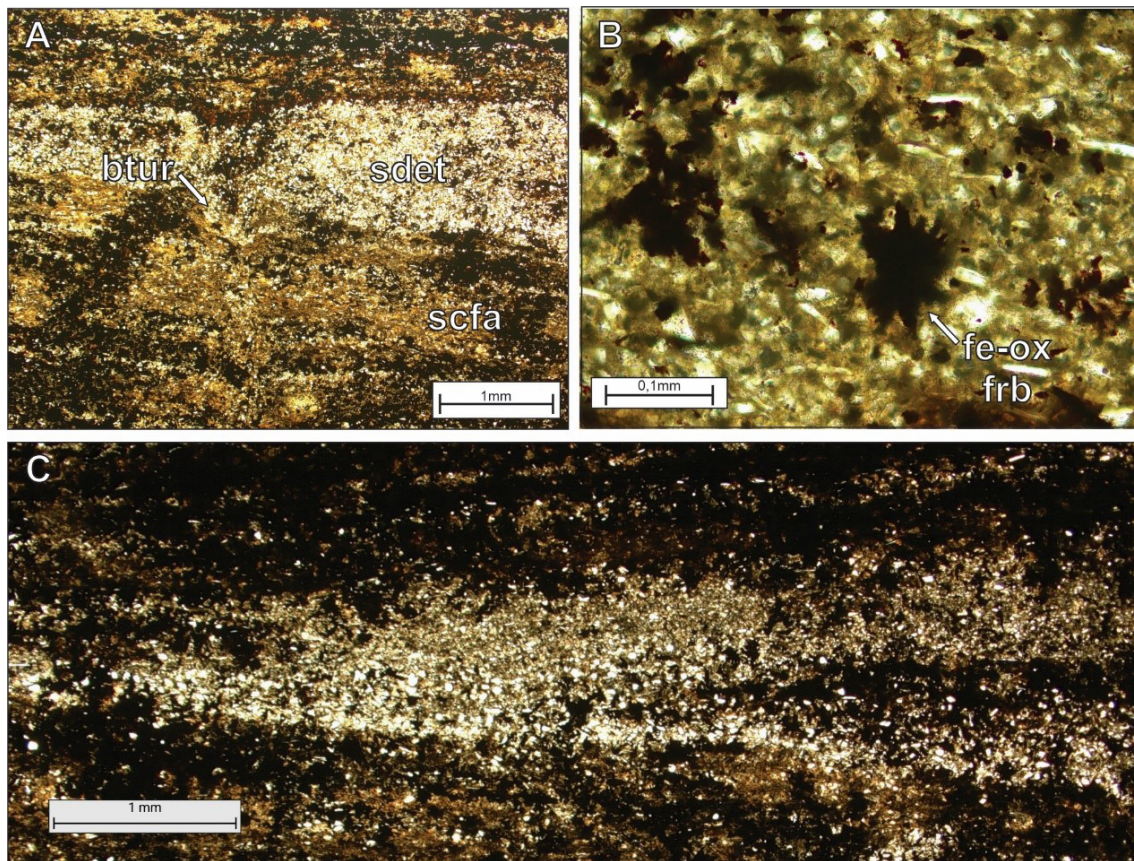


Figura 11 – Fotomicrografias da amostra PB-R-018C obtidas sob luz paralela; (A) representa parcialmente estrutura de marca ondulada com variação de tamanho e composição dos fragmentos, em sdet está a porção mais siliciclástica e em scfa os estratos mais colofaníticos, a seta indica a perfuração vertical nos estratos interpretada como bioturbação (btur); (B) fotomicrografia com aumento de 100x com detalhe para cristais de óxido de ferro em formato framboidal (fe-ox frb); (C) fotomicrografia demonstrando, em detalhe, as estruturas de marcas onduladas onde é possível perceber até certa granodecrescência ascendente no nível mais detrítico. Fonte: Elaborada pelos autores.

O padrão REE/PAAS em “S” dos fosforitos (Figura 13) indica depleção em ETRL e enriquecimento em ETRP+Y, típico de fosfogênese autigênica. Devido à contração lantanídica, ETRP^{3+} e Y^{3+} têm raio menor, substituem Ca^{2+} na CFA com maior eficiência. Em condições de baixa diluição terrígena, o espectro decresce de La-Nd e eleva de Dy-Lu+Y (Taylor; McLennan, 1985; Deng *et al.*, 2017; Gao *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2022).

Os indicadores geoquímicos de oxidação/redução (redox) nessas amostras convergem para condições subóxicas a anóxicas no fundo marinho e na zona de poros durante a precipitação/diagênese precoce. Enriquecimentos de U (410-1270 ppm) e V, com $\text{V/Cr} > 4,25$, apontam baixo teor O_2 dissolvido. A relação $\text{U/Th} \geq 1,25$ evidencia redução efetiva no sedimento (Tribovillard *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2023). Os maiores valores desse indicador foram registrados no fosforito CR-R-039C, onde também se concentram as concreções uraníferas.

Os framboides associados à matriz colofanítica são interpretados como pseudomorfos de pirita framboidal gerada por redução de

sulfato em ambiente com O_2 muito baixo e posteriormente oxidada para óxidos/hidróxidos de ferro, preservando a morfologia framboidal. As análises de MEV dos agregados opacos ($\approx 71\% \text{ Fe}$, $21\% \text{ O}$, $2,5\% \text{ Ti}$ e $4\% \text{ C}$; ausência de S) sustentam uma composição dominante de goethita/hematita framboidal com traços de Ti, As e carbono orgânico residual, compatível com substituição/oxidação de pirita em ambiente raso e com a proximidade de tapetes microbianos colofaníticos (Tribovillard *et al.*, 2006; Krajewski *et al.*, 2011).

O nível fosfático delgado, lateralmente contínuo, ocorre intercalado a siltitos e quartzarenitos de *shoreface* inferior, concentrando os maiores teores de P, U e ETR+Y do perfil, em concordância com modelos de fosfogênese autigênica precoce. Esse processo resulta pela convergência dos processos de redox de Fe-Mn e a respiração microbiana no topo do sedimento sob baixa diluição terrígena. Em condições relativamente oxidadas, o fosfato (PO_4^{3-}) é adsorvido em óxidos/hidróxidos de Fe (III); já em pulsos subóxicos-anóxicos, a redução microbiana de Fe (III) e de sulfato (SO_4^{2-}) libera PO_4^{3-} para a água intersticial.

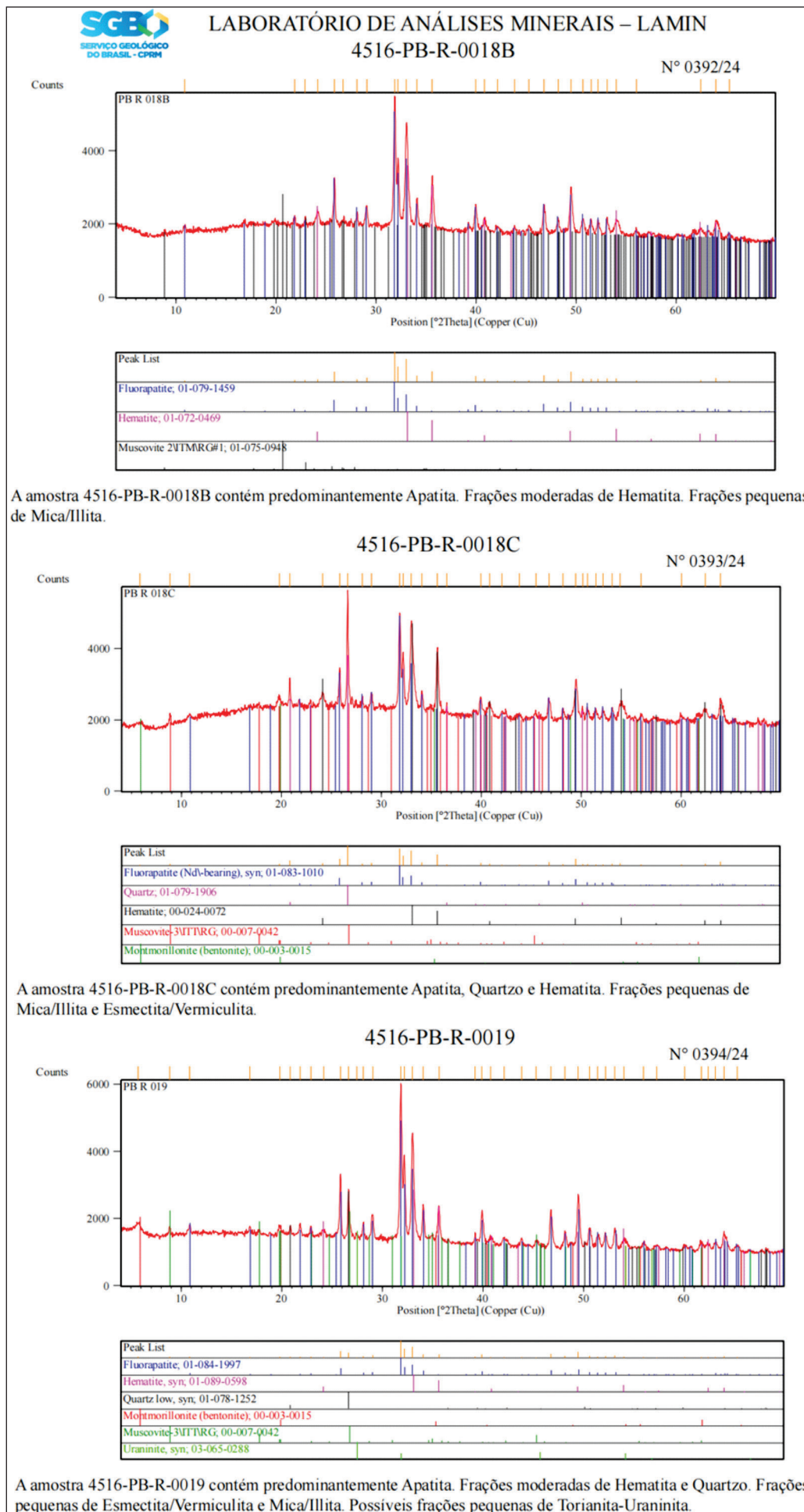


Figura 12 – Difratomogramas das amostras PB-018B, C e PB-019, demonstrando a predominância da fase formada por fluorapatita (colofana). Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 1 – Resultados geoquímicos das amostras

Amostra	PB-R-0017	PB-R-018A	PB-R-018B	PB-R-018C	PB-R-0019	CR-R-039D	CR-R-039C
Litotipo	Siltito Ferruginoso	Siltito Cinza	Fosforito Pristine	Fosforito Reworked	Fosforito Pristine	Fosforito Pristine	Fosforito Pristine
P ₂ O ₅ (%)	2,45	0,06	17,18	19,11	22,66	23,46	26,08
CaO (%)	11,2	4,84	21,7	24,5	29,3	30,2	34
SiO ₂ (%)	49,1	62,6	11,8	21,9	16,5	16,6	14,5
Al ₂ O ₃ (%)	3,47	11	5,67	6,36	6,11	7,57	6,42
Fe ₂ O ₃ (%)	12,5	3,1	34,9	18,7	17,8	13,3	10,5
MgO (%)	5,19	3,83	0,67	0,73	0,66	1,26	1,05
MnO (%)	0,44	0,14	0,28	0,05	0,14	0,05	0,06
Na ₂ O (%)	0,57	1,44	0,39	0,49	0,5	0,39	0,58
K ₂ O (%)	1,33	3,36	0,76	1,18	0,96	1,01	0,93
TiO ₂ (%)	0,58	1,07	0,62	0,6	0,58	0,47	0,41
LOI (%)	12,31	8,79	4,31	4,41	4,31	4,81	5,69
S (%)	0,04	0,02	0,13	0,15	0,2	0,11	0,16
Sr (ppm)	1362	162	2208	1878	2166	2468	2360
Ba (ppm)	335	486	2098	986	1097	1236	683
Y (ppm)	104	35	906	808	1102	2188	1701
U (ppm)	148	3	771	643	409	795	1268
Th (ppm)	34	11	624	504	659	834	344
V (ppm)	141	86	427	159	207	186	168
Cr (ppm)	32	25	36	26	29	24	25
Ni (ppm)	21	20	43	15	28	18	15
Co (ppm)	35	18	114	18	77	25	12
Zn (ppm)	154	60	74	45	62	69	74
As (ppm)	12	2	30	11	11	143	212
Cd (ppm)	1	0	0	0	0	0	0
Pb (ppm)	38	13	97	66	66	56	77
La (ppm)	37	42	199	110	198	277	90
Ce (ppm)	100	85	761	399	725	666	296
Pr (ppm)	15	10	83	41	73	73	22
Nd (ppm)	70	37	375	191	335	334	101
Sm (ppm)	21	8	104	50	94	90	25
Eu (ppm)	5	1	22	11	23	25	7
Gd (ppm)	24	7	124	67	127	143	56
Tb (ppm)	4	1	22	13	24	29	14
Dy (ppm)	23	6	156	108	184	259	150
Ho (ppm)	4	1	34	27	40	70	51
Er (ppm)	11	4	104	98	130	281	225
Tm (ppm)	1	1	13	14	17	47	45
Yb (ppm)	8	4	80	98	96	360	392
Lu (ppm)	1	1	11	16	12	59	79
CaO/P ₂ O ₅	4,57	80,67	1,26	1,28	1,29	1,29	1,30
ΣETR (ppm)	325	207	2087	1242	2078	2711	1554
ΣETRL (ppm)	243	181	1522	790	1425	1439	534
ΣETRP (ppm)	77	25	543	441	631	1248	1012
Eu/Eu*	1,00	0,93	0,92	0,90	0,97	1,02	0,93
U/Th	4,43	0,26	1,24	1,28	0,62	0,95	3,69
V/Cr	4,41	3,44	11,86	6,12	7,14	7,75	6,72

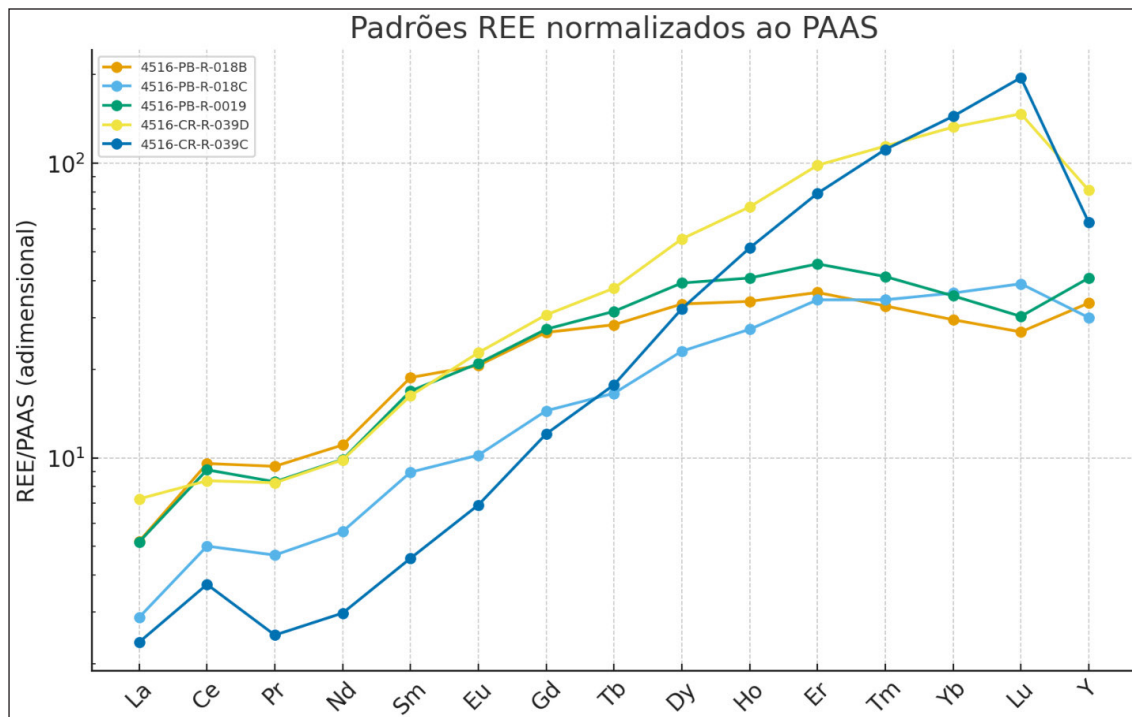


Figura 13 – Padrões ETR normalizados ao PAAS (Taylor e McLennan, 1985). Nota-se o formato de S característico de enriquecimento diferencial em ETRP, característica de fosfogênese autigênica. Fonte: Elaborada pelos autores.

Na presença de Ca^{2+} e F^- , e com difusão limitada por biofilmes, a solução de poros atinge supersaturação e nucleia carbonato-fluorapatita (francolita) sobre superfícies microbianas e grãos, capturando ETR+Y e U na fase fosfática (Tribovillard *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2022; Deng *et al.*, 2017; Krajewski *et al.*, 2011).

Em ambiente raso restrito, formam-se janelas de baixa sedimentação associadas a pulsos transgressivos (transgressão/retrogradação) com a deposição de níveis fosforíticos condensados. Com a queda do nível de base, retornaram heterólitos e arenitos finos/siltitos marcando progradação e retomada do aporte terrígeno (Caputo, 1984; Krajewski *et al.*, 2011; Vaz *et al.*, 2007).

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo revelam a presença de um intervalo fosfatado com alto valor, identificado em uma nova estação na Formação Longá, caracterizado por anomalias expressivas de fósforo (P_2O_5), concentrações significativas de elementos terras-raras (ETR), além de urânio (U) e ítrio (Y). Destacam-se os teores de P_2O_5 , até 26%, urânio até 1268 ppm, ítrio até 2189 ppm, tais valores que, em muitos casos, superam os valores observados em depósitos sedimentares clássicos (como Phosphoria e Alum Shale) e, no caso dos ETRs, até mesmo em fontes comerciais consolidadas, como as argilas iônicas chinesas.

O fosforito *pristine* é caracterizado por uma matriz microcristalina de colofana, com concreções uraníferas locais e associação com óxidos framboidais. A presença de marcas onduladas, a associação com arenitos finos, siltitos e rochas heterolíticas, além de microtexturas biogênicas, sugerem um ambiente deposicional marinho plataformar raso (*sho-reface* inferior), influenciado por episódios transgressivos e cessação das contribuições terrígenas. Os precipitados de óxidos contendo urânio entre outros metais-base são indicativos de deposição sob condições de mar restrito, com variações do nível de oxirredução associadas à alta produtividade biológica, a relativa variabilidade de aspectos microtexturais e geoquímicos em diversas amostras representando um mesmo nível estratigráfico corroboram com a hipótese de tratar-se de uma seção condensada, representando intervalo relativamente longo de tempo apesar da pouca espessura, depositada sob condições dinâmicas.

A descoberta de altos teores de mineralização da Formação Longá, associada à sua geometria estratiforme, indica a possibilidade de uma projeção em subsuperfície. Considerando que a Formação Longá possui espessura máxima em 200 metros (Vaz *et al.*, 2007), as condições favoráveis à formação de níveis fosforíticos podem ter ocorrido repetidamente em diferentes horizontes estratigráficos, o que reforça o potencial de viabilidade econômica dessa mineralização.

Recomenda-se a continuidade dos trabalhos com o refinamento do conhecimento litostratigráfico e a realização de modelagens geoquímica e geofísica, em uma abordagem integrada que busque definir os processos de formação, extensão lateral, espessura e frequência dos níveis fosfáticos. A caracterização aqui apresentada representa os primeiros passos da compreensão do modelo deposicional que possibilitou o desenvolvimento da mineralização na Formação Longá.

REFERÊNCIAS

CAPUTO, Mário Vicente. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. 1984. 583 f. Tese (Doutorado) - Universidade da Califórnia, College of Letters and Science, Santa Barbara, 1984. Programa de Doutorado em Geologia.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **SIG Brasil 1:1.000.000**: Sistema de Informações Geográficas. Rio de Janeiro: CPRM, 2004. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/> Acesso em: 12 jun. 2025.

DENG, Y. *et al.* Rare earth element geochemistry characteristics of seawater and porewater from deep sea in western Pacific. **Scientific Reports**, v. 7, n. art. 16539, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16379-1>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-16379-1>. Acesso em: 17 out. 2025.

EMSBO, P. *et al.* Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: solution to the global REE crisis? **Gondwana Research**, v. 27, n. 2, p. 776-785, fev. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.10.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X14003128?via%3Dihub>. Acesso em: 17 out. 2025.

ESRI. **World Imagery**. ArcGIS Online, 2025. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>. Acesso em: 17 out. 2025.

GAO, L. *et al.* Studies on geochemical characteristics and biomineralization of Cambrian phosphorites, Zhijin, Guizhou Province, China. **PLoS ONE**, v. 18, n. 2, e0281671, fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281671>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0281671>. Acesso em: 17 out. 2025.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 57-67, 1994.

JAXA - JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY; NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **ALOS PALSAR products**. Distributed by NASA EOSDIS, Alaska Satellite Facility (ASF) DAAC, 2006-2011. Disponível em: <https://search.earthdata.nasa.gov/>.

KRAJEWSKI, K.P. Phosphatic Microbialites in the Triassic Phosphogenic Facies of Svalbard. In: TEWARI, V., SECKBACH, J. (eds.) **STROMATOLITES: Interaction of Microbes with Sediments**. Dordrecht : Springer, 2011. P. 187-222. (Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology, 18). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/226015334_Phosphatic_Microbialites_in_the_Triassic_Phosphogenic_Facies_of_Svalbard. Acesso em: 17 out. 2025.

LIMA, Enjôlas de A. Medeiros; LEITE, Jairo Fonseca. **Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Integração Geológico - Metalogenética. Etapa III: Relatório de Progresso**. Fase de Campo I. Recife: CPRM, 1977 3 v. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/9382>. Acesso em: 12 jun. 2025.

OPENAI. **ChatGPT**: language model (versão de março de 2025). San Francisco: OpenAI, 2025. Disponível em: <https://chat.openai.com/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

RODRIGUES, R. **Geoquímica Orgânica na Bacia do Parnaíba**. 1995. 225 f. il., mapas. Tese (Doutorado em Geoquímica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

REN, Jiangbo *et al.* Enrichment and sources of REY in phosphate fractions: Constraints from the leaching of REY-rich deep-sea sediments. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 335, p. 155-168, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.08.035>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703722004550?via%3Dihub>. Acesso em: 12 jun. 2025.

TAYLOR, S. R.; McLENNAN, S. M. **The Continental Crust: Its Composition and Evolution**. Oxford: Blackwell, 1985. 612 p.

TRIBOVILLARD, Nicolas *et al.* Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. **Chemical Geology**, v. 232, n. 1-2, p. 12-32, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000925410600132X?via%3Dihub>. Acesso em: 17 out. 2025.

VAZ, Pekim Tenório *et al.* Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 253-263, 2007. Disponível em: <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/308>. Acesso em: 12 jun. 2025.

INFORME TÉCNICO Nº 28

Brasília, novembro de 2025.
ISSN: 2448-2242

Publicação on-line seriada
Serviço Geológico do Brasil
Disponível em: www.sgb.gov.br

Serviço Geológico do Brasil

SBN – Quadra 02 – Bloco H, Ed. Central Brasília,
1º andar
Brasília - DF - Brasil
CEP: 70040-904
Telefone: (61) 2108-8400
www.sgb.gov.br
Contatos: seus@sgb.gov.br
maisa.abram@sgb.gov.br



DIRETOR DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS

Francisco Valdir Silveira

CORPO EDITORIAL

Maisa Abram Bastos (Editor)
Guilherme Ferreira da Silva

REVISÃO

Hugo José de Oliveira Polo

REVISÃO GRAMATICAL E ORTOGRÁFICA

Irinéia Barbosa da Silva

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Maria Gasparina de Lima

DIAGRAMAÇÃO

Marcelo Henrique Borges Leão