



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

DISSERTAÇÃO Nº 679

**QUÍMICA MINERAL DE APATITA DOS DEPÓSITOS SÃO
JORGE E SÃO CHICO, PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS,
CRÁTON AMAZÔNICO**

Dissertação apresentada por:

ADRIANE MARQUES DE SOUZA

Orientador: Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão (UFPA)

**BELÉM-PARÁ
2025**

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

S719q Souza, Adriane Marques de.
Química mineral de apatita dos depósitos São Jorge e São
Chico, Província Mineral do Tapajós, Cráton Amazônico / Adriane
Marques de Souza. — 2025.
x, 46 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia
e Geoquímica, Belém, 2025.

1. depósito aurífero. 2. granitos paleoproterozoicos. 3.
elemento traço. 4. MEV-EDS. 5. apatita. I. Título.

CDD 016.55



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

**QUÍMICA MINERAL DE APATITA DOS DEPÓSITOS SÃO
JORGE E SÃO CHICO, PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS,
CRÁTON AMAZÔNICO**

Dissertação apresentada por

ADRIANA MARQUES DE SOUZA

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA e PETROLOGIA, Linha de Pesquisa EVOLUÇÃO CRUSTAL E
METALOGÊNESE.**

Data da Aprovação: 11 / 10 / 2025

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão
(Orientador - UFPA)


Prof. Dr. Herbert Conceição
(Membro - UFS)


Prof. Dr. Ricardo Ramos Spreafico
(Membro - UFPA)

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de sabedoria, força e inspiração, por me guiar e sustentar em cada etapa desta jornada.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), em especial ao Instituto de Geociências e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, por todo o suporte oferecido durante a elaboração desta dissertação.

À CAPES, pelo apoio concedido por meio da bolsa de estudos. Código de financiamento 001.

À minha família por estar sempre ao meu lado e torcer por mim em todas as etapas deste ciclo.

Ao Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão, pela orientação cuidadosa, com muita confiança e respeito ao longo do trabalho. Graças ao seu apoio e incentivo, pude permanecer firme e confiante ao longo desta jornada, proporcionando sempre um ambiente em que me senti à vontade para expor minhas ideias, ao mesmo tempo em que contribuiu com suas próprias reflexões de forma construtiva e enriquecedora.

Ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG), do Instituto de Geociências da UFPA, pelo suporte técnico e científico.

Ao Laboratório de Microanálises, pelo cuidado e atenção ao longo das análises e resultado obtidos no MEV. Assim como, a Gisele Marques e Ana Paula Correa que me acompanharam e incentivaram para conseguir finalizar esta etapa.

Ao Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), especialmente ao geólogo Dr. Marcelo Lacerda Vasquez, por disponibilizarem parte das amostras fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

À Joelma Lobo, técnica do Laboratório de Laminação da UFPA, pela dedicação e eficiência no preparo das lâminas utilizadas neste estudo.

Aos amigos que a Geologia me presenteou e me acompanharam ao longo dessa jornada, em especial Sara Braga, Mayara Raiol, Sarah Miranda, Brenda Barros, Julio Richard e Alan Queiroz.

Por fim, estendo minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

RESUMO

As assinaturas geoquímicas de alguns minerais acessórios como zircão, apatita, titanita e rutilo podem funcionar como bons indicadores petrológico e metalogenético de corpos mineralizados ou de depósitos de interesse econômico. A apatita, objeto deste estudo, é uma fase acessória comum em rochas granitoides e considerada um mineral resistato indicador capaz de fornecer informações sobre as condições geológicas em que sua rocha hospedeira esteve submetida. Neste trabalho, foram utilizados cristais de apatita de rochas granitoides moderada a intensamente hidrotermalizadas que hospedam os depósitos auríferos São Jorge (DSJ) e São Chico (DSC), ambos localizados na Província Mineral do Tapajós (PMT). O objetivo principal desta pesquisa é identificar os aspectos morfológicos e as assinaturas geoquímicas desses cristais, avaliando os parâmetros que podem ser utilizados como indicadores em potencial para este tipo de mineralização. Desse modo, para obter a química mineral da apatita foram realizadas análises semiquantitativas de elementos comumente encontrados em sua estrutura, como O, F, Ca, P, Na, Si, Sr, Fe, Cu, Pd, Ag, Hg, Pb, Bi, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho e Yb, e os dados obtidos tratados em diagramas específicos para distinguir quimicamente rochas mineralizadas das estéreis. Morfológicamente, cristais com formas subédricas a anédricas, localmente mais fraturados e corroídos, são dominantes nas zonas mais alteradas e mineralizadas. Composicionalmente, esses cristais apresentam teores mais elevados, ou uma tendência ao enriquecimento, em F, Y, Hg+Pb+Bi e F/Cl. A eficiência desta metodologia pode ser utilizada como uma ferramenta complementar para a exploração mineral em outras áreas além do Domínio Tapajós.

Palavras-chave: depósito aurífero; granitos paleoproterozoicos; elemento traço; MEV-EDS; apatita.

ABSTRACT

The geochemical signatures of certain accessory minerals such as zircon, apatite, titanite, and rutile can serve as valuable petrological and metallogenetic indicators of mineralized bodies or economically significant deposits. Apatite, the focus of this study, is a common accessory phase in granitoid rocks and is considered a resistate indicator mineral capable of providing insights into the geological conditions to which its host rock was subjected. In this work, apatite crystals from moderately to intensely hydrothermally altered granitoid rocks hosting the São Jorge (DSJ) and São Chico (DSC) gold deposits – both located in the Tapajós Mineral Province (TMP) - were analyzed. The main objective of this research is to identify the morphological features and geochemical signatures of these crystals, assessing the parameters that may serve as potential indicators for this type of mineralization. To determine the mineral chemistry of apatite, semi-quantitative analyses were performed for elements commonly incorporated in its structure, such as O, F, Ca, P, Na, Si, Sr, Fe, Cu, Pd, Ag, Hg, Pb, Bi, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho, and Yb. The resulting data were treated using specific diagrams to distinguish mineralized rocks from barren ones chemically. Morphologically, subhedral to anhedral apatite crystals, locally more fractured and corroded, are dominant in the most altered and mineralized zones. Compositionally, these crystals exhibit higher concentrations, or a tendency toward enrichment, in F, Y, Hg+Pb+Bi, and F/Cl. The effectiveness of this methodology demonstrates its potential as a complementary tool for mineral exploration in regions beyond the Tapajós Domain.

Keywords: gold deposit; Paleoproterozoic granites; trace element; SEM-EDS; apatite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Mapa de localização, evidenciando em A e B a localização dos municípios de Itaituba e Novo Progresso em contexto nacional e estadual, respectivamente. Em C é apontada a localização dos depósitos São Jorge e São Chico em relação ao contexto municipal. 3
- Figura 2- Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico segundo (A) Tassinari & Macambira (1999) e (B) Santos (2003), incluindo os domínios tectônicos das províncias Tapajós–Parima e Amazônia Central (Juliani *et al.* 2014). 10
- Figura 3- Mapa geológico contextualizando a Província no Cráton Amazonas (A) e os quatro domínios da Província Tapajós-Parima (B) (Santos *et al.* 2003). 11
- Figura 4- Mapa de localização da Província (A) e mapa geológico do DTJ indicando alguns dos principais depósitos de ouro, com ênfase na área de estudo (B) (Vasquez *et al.* 2008, Lima 2021). 12
- Figura 5- Mapa Geológico com ênfase em unidades associadas aos depósitos São Jorge e São Chico. 17
- Figura 6- Imagens macroscópicas de amostras dos furos de sondagem do Granito São Jorge Jovem, correspondentes às associações minerais de Borges *et al.* (2009). (A) Associação 1 - rocha granítica com textura ígnea preservada e presença de veios aplíticos de espessura centimétrica; (B e C) Associação 2 - rocha pouco alterada com coloração mais avermelhada; (D) Associação 3 - rocha hidrotermalizada, contendo vênulas e veios de quartzo, pobremente mineralizada; (E e F) Associação 4 - rocha intensamente hidrotermalizada/mineralizada, com porções avermelhadas ou esverdeadas, cortada por veios centimétricos de quartzo. 20
- Figura 7- Principais associações minerais representativas dos diferentes estágios de evolução das rochas do depósito São Jorge (Borges *et al.* 2009). 21
- Figura 8- Alteração hidrotermal e mineralização do depósito São Chico. A) Granito hospedeiro com feldspato potássico (Kfs) hidrotermal hematitizado, agregados de clorita (Chl), vênulas de sericita (Ser) e pirita (Py) disseminada. B) Veio de quartzo (Qtz) com adulária (Adl) e galena (Gn) e envelope de sericita na margem. C) Envelope de sericita e quartzo com pirita em agregados. D) Vênula de clorita cortando pirita em veio de quartzo. E) Propilitização de granito com substituição de minerais máficos por clorita e epidoto (Ep) e cortado por vênulas

- de quartzo tardias com textura em pente. F) Vênula de carbonato (Cb) cortando granito sericitizado e com pirita. Fonte: Vasquez *et al.* (2024). 22
- Figura 9- Aspectos petrográficos do GSJJ, hospedeiro do depósito São Jorge. Associações 1: cristais de anfibólio, biotita e plagioclásio bem preservados, porém com leve alteração para biotita, clorita e sericita, respectivamente (A-D). Associação 4: cristais euédricos de pirita, quartzo e carbonatos (E-F). Qz: quartzo; Py: pirita; Cb: carbonato. Ser: sericita; Amp: anfibólio; Bt: biotita..... 24
- Figura 10- Cristais de apatita da zona não mineralizada (Associação 1) inclusos predominantemente em biotita e anfibólio, associados a cristais de quartzo e feldspato (A-D) ou a cristais de titanita, zircão e magnetita (E-F). A e B: imagens de luz transmitida. C a F: imagens de elétrons retroespalhados. Cruz vermelha: pontos analisados. Ap: apatita; Bt: biotita; Kf: feldspato potássico; Qz: quartzo; Pl: plagioclásio; Mag: magnetita; Zrn: zircão; Ttn: titanita. 25
- Figura 11- Imagens de ERE de cristais anédricos e corroídos de apatita (Ap) da zona mineralizada (Associação 4) ou inclusos e associados a cristais de e pirita (Py). Cruz vermelha: pontos analisados. 26
- Figura 12- Biotita monzogranito com alteração potássica acentuada, alterando cristais de feldspato (A) e com superposição de vênulas tardias de carbonato e quartzo (B e C). A biotita ainda tem algumas feições preservadas, mas já está no estágio inicial de alteração para clorita (D). 27
- Figura 13- Biotita monzogranito com alteração potássica e clorítica avançadas (A-B), com alteração sericítica moderada (C-D), evidenciando a zona transicional para zona mineralizada (não mostrada). 28
- Figura 14- Veio mineralizado com sulfetos e quartzo (A-B), assim como feldspatos em estágio avançado de alteração sericítica (C-D). 29
- Figura 15- Imagens de elétrons retroespalhados. (A e B): Cristais de apatita (Ap) do depósito São Chico inclusos em biotita (Bt) e plagioclásio (Pl). Nas porções mais alteradas, a apatita normalmente é anédrica, corroída e inclusa em quartzo (Qtz) (C e D) ou inclusa/associada à pirita (Py), zircão (Zrn) e galena (Gn) (Figuras C a F). 30
- Figura 16- Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) do depósito São Jorge, das apatitas da zona estéril/inalterada (A-B) associadas a minerais primários da rocha (Bt e Mag), assim como das apatitas da zona hidrotermalizada/mineralizada (C-D) associada a sulfetos. Cruz vermelha: análises de MEV-EDS. 31

Figura 17- Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) do depósito São Chico, das apatitas da zona hidrotermalmente alterada, mas não mineralizada (A-B), assim como das apatitas da zona mineralizada/em veios (C-D). Cruz vermelha: análises de MEV-EDS.	32
Figura 18- Diagramas representativos das assinaturas geoquímicas obtidas por MEV-EDS presentes nas apatitas do Depósito São Jorge.	35
Figura 19- Diagramas representativos das assinaturas geoquímicas obtidas por MEV-EDS presentes nas apatitas do Depósito São Jorge, destacando apenas a zona mineralizada e zona estéril.	36
Figura 20- Diagramas representativos das assinaturas geoquímicas, obtidas por MEV-EDS, presentes nas apatitas do Depósito São Chico.	38
Figura 21- Diagramas com razões $F/Cl \times F$ e $F/Cl \times Y$ das apatitas dos depósitos São Jorge e São Chico, PMT.	40

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS	4
1.4.1 Levantamento bibliográfico	4
1.4.2 Preparação de amostras	4
1.4.3 Análises petrográficas	4
1.4.4 Análise de MEV-EDS	5
1.4.5 Tratamento de dados	5
2 APATITA COMO MINERAL INDICADOR	6
2.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS	6
2.2 QUÍMICA MINERAL DA APATITA	6
2.3 APATITA EM DEPÓSITOS AURÍFEROS DA PMT	8
3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	9
3.1 CRÁTON AMAZÔNICO	9
3.2 PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS E DOMÍNIO TAPAJÓS	10
4 DEPÓSITOS AURÍFEROS DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS	16
4.1 DEPÓSITO SÃO JORGE	17
4.2 DEPÓSITO SÃO CHICO	21
5 RESULTADOS	23
5.1 PETROGRAFIA	23
5.1.1 Granito São Jorge Jovem (GSJJ)	23
5.1.2 Granito São Chico (GSC)	27
5.2 MORFOLOGIA DOS CRISTAIS DE APATITA	31
5.3 QUÍMICA MINERAL DE APATITA POR EDS	32
5.3.1 Depósito São Jorge (DSJ)	32
5.3.2 Depósito São Chico (DSC)	36
6 DISCUSSÕES	39
7 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A região de estudo dos dois depósitos de interesse, São Jorge (DSJ) e São Chico (DSC), está localizada no Domínio Tapajós, da Província Tapajós-Parima (Santos 2003) ou Ventuari-Tapajós (Tassinari & Macambira 2004), próximo ao limite leste com a Província Amazônia Central. Nesta porção do cráton, há ocorrência de diversos depósitos auríferos associados ao magmatismo paleoproterozoico que atrai o investimento de inúmeras empresas no desenvolvimento de estudos e, possivelmente, de atividade minerária.

A investigação do potencial econômico de um determinado corpo ou de uma área específica carece de técnicas diversas como mapeamento geológico e amostragem sistemática, furos de sondagem, bem como de análises químicas em rocha total em busca de teores que indiquem concentrações elementares atraentes. Entretanto, as etapas de sondagem e análises químicas são muito onerosas e podem limitar a evolução das atividades por conta do encarecimento desses métodos de investigação.

Atualmente existem inúmeros trabalhos que demonstram que as assinaturas geoquímicas de alguns minerais acessórios, como **zircão** (Hoskin & Ireland 2000, Lamarão *et al.* 2007, 2018, Breiter *et al.* 2014, Lu *et al.* 2016, Li *et al.* 2018), **apatita** (Sha & Chappell 1999, Belousova *et al.* 2002, Cao *et al.* 2011, Bouzari *et al.* 2016, Fonseca 2016, Mao *et al.* 2016, Nery 2017, Bruand *et al.* 2017, Azadbakht *et al.* 2018, Leite 2020, Liu *et al.* 2020, Li *et al.* 2022, Corrêa 2022, Lin *et al.* 2023), **titanita** (Che *et al.* 2013), **rutilo** (Triebold *et al.* 2011, Plavsa *et al.* 2018, Agangi *et al.* 2019, Medeiros, 2025) e outros (Fernandes *et al.* 2006, Hong *et al.* 2021) podem funcionar como bons indicadores petrológicos e metalogenéticos de corpos mineralizados ou de depósitos de interesse econômico. Assim, o estudo prévio de minerais acessórios pode auxiliar as etapas de sondagem e pesquisa detalhada, se constituindo em uma alternativa complementar para a prospecção mineral.

A apatita é uma fase acessória comum em rochas granitoides devido, em grande parte, à sua elevada estabilidade a processos geológicos, como o intemperismo e alteração hidrotermal. Sua estrutura cristalina pode incorporar uma variedade de elementos menores e traços geologicamente importantes, os quais podem servir como bons indicadores petrológicos e metalogenéticos do contexto em que sua rocha hospedeira está inserida. Esses elementos podem auxiliar no entendimento das condições reinantes durante a sua cristalização e sobre o potencial metalogenético presente. Assim como o

zircão, a apatita é um mineral resistato indicador (RIM – *Resistate Indicator Mineral*) utilizado em exploração mineral e, vem sendo utilizado amplamente para fornecer informações das condições geológicas em que a rocha esteve submetida, como, por exemplo, eventos de mineralização (Sha & Chappell 1999, Belousova *et al.* 2002, Chu *et al.* 2009).

Para o estudo das apatitas foram realizadas descrições petrográficas por luz transmitida, análises semiquantitativas por Microscopia Eletrônica de Varredura – Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV-EDS). Análises quantitativas por Microsonda Eletrônica estão previstas para a elaboração de um artigo científico. As análises de MEV-EDS envolveram os elementos O, F, Ca, P, Na, Si, Sr, Fe, Cu, Pd, Ag, Hg, Pb, Bi, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho e Yb, comumente encontrados na estrutura dos cristais de apatita.

Os dados obtidos foram tratados em diagramas específicos com o objetivo de distinguir as assinaturas geoquímicas de cristais de apatita presentes nas zonas mineralizadas, ou com potencial para conter mineralizações de ouro, e estéreis. Essa abordagem, além de distinguir estas zonas, permitiu o aprofundamento de discussão em relação à caracterização petrológica e metalogenética da rocha em que o mineral acessório está inserido. Além disso, estudos dessa natureza são escassos na região, a qual detém depósitos auríferos de interesse regional e nacional.

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O depósito São Jorge está localizado na região de Vila Riozinho, no município de Novo Progresso, a uma distância aproximada de 300 km ao sul da cidade de Itaituba. O principal acesso para o projeto é pela Rodovia BR-163 (Rodovia Cuiabá-Santarém) seguido do acesso pela vicinal São Jorge (Figura 1).

O depósito São Chico está localizado na região de Vila São Chico, no município de Jacareacanga, distante aproximadamente 200 km ao sul da cidade de Itaituba. O acesso rodoviário pode ser feito pela Rodovia Transgarimpeira, com percurso total de aproximadamente 340 km, ou por via aérea partindo de Itaituba ou Santarém, visto que há duas pistas de pouso a 2 km da Vila São Chico (Figura 1).

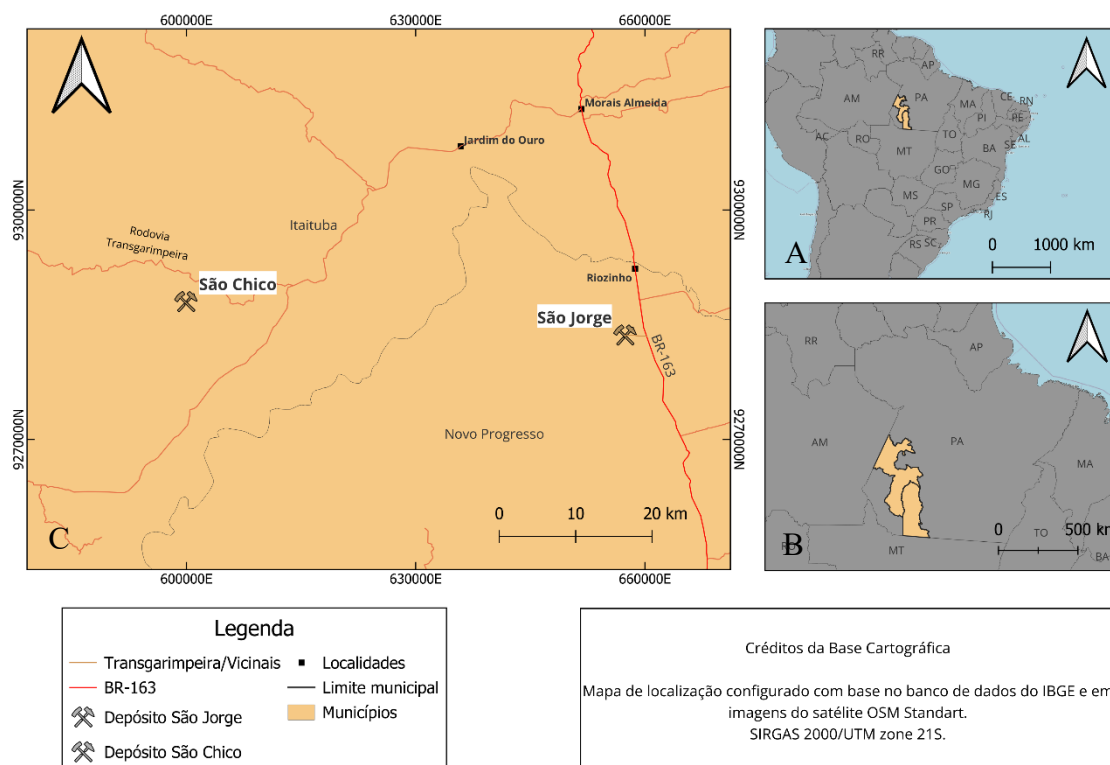


Figura 1- Mapa de localização, evidenciando em A e B a localização dos municípios de Itaituba e Novo Progresso em contexto nacional e estadual, respectivamente. Em C é apontada a localização dos depósitos São Jorge e São Chico em relação ao contexto municipal.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Identificar a assinatura geoquímica de cristais de apatita para serem utilizados como indicadores em potencial de granitoides auríferos da Província Mineral do Tapajós.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Selecionar cristais de apatita das zonas mineralizada e estéril dos depósitos São Jorge e São Chico, Província Mineral do Tapajós, para posteriores análises químicas pontuais;
- Identificar modificações texturais (p.ex. corrosão, zoneamentos, alterações, inclusões) em cristais de apatita decorrentes de possíveis transformações/alterações hidrotermais;
- Caracterizar geoquimicamente os elementos maiores, menores e traço presentes nesses cristais;

- Comparar, através de diagramas geoquímicos, as variações composicionais das apatitas das zonas mineralizada e estéril dos dois depósitos selecionados e discutir as implicações das possíveis diferenças;

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1 Levantamento bibliográfico

Foram consultadas teses, dissertações, livros, relatórios técnicos e artigos de referência a respeito do Cráton Amazônico, especialmente do Domínio Tapajós, abordando a petrografia, geoquímica e geocronologia de granitoides que ocorrem na região.

Além disso, foram consultados outros trabalhos que abordam estudos de química mineral de apatitas de granitoides para fins petrológicos e/ou metalogenéticos ou trabalhos envolvendo química mineral de outros minerais acessórios utilizando metodologia similar. Os princípios básicos de aplicação das metodologias analíticas também foram estudados, buscando utilizá-los com maior aproveitamento (Reed 1996, Klein e Dutrow 2012, Gomes 2015).

1.4.2 Preparação de amostras

As amostras e seções polidas do depósito São Jorge estão no acervo do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides do IG (GPPG) e foram cedidas a partir da conclusão de trabalhos anteriores feitos na região. As amostras do depósito São Chico foram cedidas pelo geólogo Dr. Marcelo Lacerda Vasquez do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Quando necessárias novas amostras foram submetidas à oficina de laminação do IG-UFPA para confecção de seções polidas de porções mais interessantes e representativas dessas amostras.

Foram disponibilizadas 33 lâminas, sendo 25 correspondentes ao depósito São Jorge e 8 lâminas do depósito São Chico.

1.4.3 Análises petrográficas

Foram realizadas análises petrográficas por luz transmitida, com destaque para os aspectos texturais, morfológicos, alterações e associações da mineralogia acessória, especialmente da apatita. Esta etapa foi realizada no Laboratório de Petrografia do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) do Instituto de Geociências da UFPA, sendo utilizado equipamento de modelo convencional Leica / DM 2700 P com câmera acoplada que permitiu a captura de fotomicrografias com o programa Leica Application Suite.

Para as análises petrográficas foram selecionadas 15 lâminas do depósito São Jorge e 8 lâminas do depósito São Chico, totalizando 23 lâminas. Nesta etapa buscou-se localizar os minerais destinados às análises de MEV-EDS, delimitando muito bem a zona estéril e a zona mineralizada de cada depósito, a partir da descrição já existente na literatura e das amostras disponibilizadas.

1.4.4 Análise de MEV-EDS

Foram realizadas no Laboratório de Microanálises do IG-UFPA com o MEV LEO-ZEISS 1430 equipado com sistema de EDS a seco Sirius-SD em cristais de apatita previamente selecionados. As lâminas e seções polidas receberam metalização com carbono para a obtenção de imagens de elétrons retroespalhados (ERE) e análises por EDS. As imagens de ERE foram importantes para identificar tipos morfológicos distintos, possíveis alterações e zoneamentos composicionais. As condições de operação foram: corrente do feixe de elétrons = 90 μ A, voltagem de aceleração constante = 20 kV, distância de trabalho variável entre 15 e 16 mm.

O equipamento em questão fornece os teores elementares como porcentagem de cátions individualizados e não em óxidos, assim, a rotina analítica envolveu O, P, Ca, F, Cl, Y, Hg, Pb e Bi, além de elementos como ETR's (La, Ce, Sm, Eu, Gd, Yb), Si, Na, Mg, Mn, Fe, Cu, Ag, Sr, Te, V, Sb; estes, porém, foram desconsiderados devido apresentarem valores abaixo do limite de detecção (1000 ppm). Para as análises geoquímicas com EDS foram selecionadas 7 lâminas do depósito São Jorge e 6 do depósito São Chico, sendo elas as mais representativas dos depósitos em questão. A partir dessas análises, foram consideradas válidas 975, sendo 523 referentes ao depósito São Jorge e 452 ao depósito São Chico.

1.4.5 Tratamento de dados

Os dados de química mineral foram tratados estatisticamente em planilhas Excel, sendo avaliados índices de correlação entre os elementos e seus comportamentos em diagramas binários ou ternários. Os diagramas foram confeccionados com Software GCDkit (Janoušek *et al.* 2006) para uma melhor distribuição e visualização das análises.

2 APATITA COMO MINERAL INDICADOR

2.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

A apatita, de composição $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, é um mineral acessório comum que se forma normalmente nos primeiros estágios de cristalização da rocha e pode ocorrer em vários tipos, seja esta sedimentar, ígnea ou metamórfica. Além disso, mostra certa estabilidade mecânica e química, e alta capacidade de incorporar elementos traço em sua estrutura. Pode ser considerada de grande utilidade para o entendimento dos processos de evolução do magma, petrogenéticos e metalogenéticos (Sha & Chappell 1999, Hoskin *et al.* 2000, Belousova *et al.* 2001, 2002, Chu *et al.* 2009, Cao *et al.* 2011, Fonseca 2016, Bouzari *et al.* 2016, Xu *et al.* 2024).

Os elementos traço entram em sua estrutura substituindo principalmente o Ca, entre os quais é possível destacar: Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Eu^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} e Cd^{2+} , devido à semelhança no estado de valência e raio iônico. Porém, outros elementos traço que podem estar envolvidos nesse processo de substituição são ETR^{3+} , Y^{3+} , U^{4+} , Th^{4+} , Ce^{4+} , Al^{3+} e Na^+ . As substituições do PO_4^{3-} podem ser: SiO_4^{3-} , AsO_4^{3-} , VO_4^{3-} , CrO_4^{3-} , CrO_4^{2-} , MnO_4^{3-} e SO_4^{2-} (Sha & Chappell 1999, Leite 2020).

O hábito que a apatita exhibe pode determinar algumas interpretações, como um resfriamento rápido com o hábito acicular ou faces cristalinas mal desenvolvidas devido a cristalização tardia e até mesmo vários tipos de morfologia mineral que sugere uma história magmática complexa. A investigação geocronológica e termocronológica da apatita pode ser realizada pelo decaimento radioativo dos sistemas isotópicos Lu-Hf (675-750 °C), U-Pb (350-550 °C), traços de fissão (60-110 °C) e de (U-Th)/He (40-80 °C) (Chew & Spikings 2015, 2021, Farias 2025).

2.2 QUÍMICA MINERAL DA APATITA

Como principais constituintes da apatita, CaO e P_2O_5 podem apresentar correlação inversamente proporcional quanto ao grau de fracionamento e possível contaminação crustal, porém, de forma discreta com o P diminuindo e o Ca aumentando em relação aos conteúdos de sílica em rocha total (Belousova *et al.* 2001).

A caracterização de elementos traços na apatita pode evidenciar processos magmáticos aos quais a rocha foi submetida, como o grau de fracionamento, contaminação crustal e condições de cristalização. Belousova *et al.* (2001, 2002) e Fonseca (2016) demonstraram que plútons fortemente oxidados têm concentrações mais elevadas de ETR leves, evidenciando altos valores na razão La/Ce, La/Yb, La/Sm e

baixos de Y/ETR em granitoides oxidados. Além disso, a anomalia de Eu reflete um empobrecimento do elemento devido à sua concentração no plagioclásio; pode também inferir o estado redox do magma, sendo isso demonstrado por Sha & Chappell (1999), Belousova *et al.* (2001) e Cao *et al.* (2011), visto que a acentuação da anomalia demonstra um caráter mais redutor. Segundo Mao *et al.* (2016), anomalia negativa de Eu pode ter implicação metalogenética para depósitos porfíricos e do tipo IOCG, diferenciando os dois a partir do teor de Mn, o qual é mais baixo em depósitos do tipo IOCG.

Na sua estrutura, a concentração de íons de F, Cl e OH podem variar e são fundamentais na classificação do tipo de apatita, normalmente classificada como flúor apatitas em rochas ígneas (Belousova *et al.* 2001). Sha & Chappell (1999) demonstraram por meio da razão F/Cl que os teores mais elevados de F estão associados a magmas mais evoluídos e peraluminosos, enquanto o Cl tende a relacionar-se a fluidos ricos em metais essenciais para o transporte do ouro, como Cu, Pb e Zn. Sendo assim, este parâmetro é um eficiente indicador do ambiente de cristalização, assim como demonstrado posteriormente por Cao *et al.* (2011) a relação inversamente proporcional entre esses elementos halogênicos na apatita. Segundo Liu *et al.* (2020), valores mais elevados da razão F/Cl podem indicar porções mineralizadas, quando comparados a porção estéril da rocha.

Chu *et al.* (2009) destacam que elementos como F e Mn podem caracterizar a rocha de acordo com o índice de saturação em alumínio (ISA), evidenciando que em magmas mais aluminosos o F e o Mn tendem a concentrar-se nas apatitas. A concentração do Mn na apatita ocorre pelo processo de substituição do Ca; essa concentração pode ser maior em granitoides reduzidos ou em zonas menos alteradas de depósitos porfíricos (Belousova *et al.* 2001, Bouzari *et al.* 2016, Mao *et al.* 2016).

Elementos como As, Zn, Ni, Cu, Fe, S e Mg podem ser usados para rastrear a associação da apatita com certos tipos de mineralizações; isso porque, é possível que alguns minerais opacos se acomodem em quantidades mensuráveis na estrutura da apatita, na forma de inclusões, sejam eles óxidos ou sulfetos (Sha & Chappell 1999, Belousova *et al.* 2002, Azadbakht *et al.* 2018). Além disso, Sha & Chappell (1999) indicaram uma correlação positiva entre Na e S na apatita, provocada provavelmente pelo processo de substituição do Ca e P do mineral.

Outras metodologias, como a catodoluminescência (CL), podem aliar-se à química mineral de apatitas para caracterizar zonas de alteração e identificar recristalizações induzidas por fluidos hidrotermais, comumente associados a depósitos

auríferos, como demonstram Bouzari *et al.* (2016) e Liu *et al.* (2020). Entre as evidências apontadas, rochas inalteradas apresentam luminescência amarela, altas razões Mn/Fe (>1), altas concentrações de Mn e ETR, assim como diminuição dos teores de Na, Cl e S. Enquanto rochas alteradas demonstram valores opostos e, dependendo da alteração, a luminescência pode ser verde (potássica) ou cinza (fílica) (Bouzari *et al.* 2016, Mao *et al.* 2016).

A química mineral de apatitas pode ser muito eficiente na caracterização petrológica e metalogenética de um depósito, porém outros minerais também já mostraram eficiência neste tipo de estudo, como o zircão, a titanita e a monazita. Esses minerais mostram facilidades semelhantes à apatita na incorporação de elementos traço na sua estrutura; assim, quando analisados em conjunto (Bouzari *et al.* 2016, Mao *et al.* 2016, Bruand *et al.* 2017).

2.3 APATITA EM DEPÓSITOS AURÍFEROS DA PMT

A mineralização de ouro dos depósitos auríferos contidos nos granitoides paleoproterozoicos da Província Tapajós associa-se, geralmente, a granitoides cálcio-alcalinos de alto K, metaluminosos e com estado de oxidação no limite entre as séries ilmenita e magnetita (Villas *et al.* 2013, Vasquez *et al.* 2017b, 2024). Além disso, apresenta grande influência das alterações hidrotermais a que as rochas foram submetidas, visto que os processos metalogenéticos predominantes nas rochas da região estão inseridos em um sistema magmático-hidrotermal (Juliani *et al.* 2014, 2021, Vasquez *et al.* 2024).

Levando em consideração os dois depósitos de interesse, São Jorge e São Chico, ambos apresentam mineralização associada à alteração hidrotermal, especialmente à sericitização, o estilo em *stockwork* e disseminado, assim como sua gênese relacionada a depósitos do tipo IRGS (*Intrusion Related Gold Systems*) ou do tipo pórfiro; contudo não é possível definir o modelo de depósito baseado somente na química mineral acessória e, por isso, este trabalho não discute a determinação de um modelo metalogenético.

A química mineral em cristais de apatita foi realizada em depósitos auríferos distinguindo com sucesso tipos diferentes (Leite 2020, Qiu *et al.* 2024) com análises de elementos traço como Th, U, Nd, F, Cl, Mn, ETR, Sr e Ge. Além disso, em depósitos hidrotermais a composição da apatita pode se enriquecer em elementos que acompanham a mineralização sejam metais ou sulfetos (Belousova *et al.* 2002, Azadbakht *et al.* 2018).

3 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1 CRÁTON AMAZÔNICO

Na discussão da evolução crustal do Cráton Amazônico, as vertentes que justificam a configuração atual pautam-se em uma origem a partir de retrabalhamento de crosta antiga (Hasui *et al.* 1984) ou por acreção crustal juvenil (Tassinari & Macambira 1999, Almeida *et al.* 2001, Santos 2003). O modelo de acreção crustal está baseado em uma interpretação integrada de grande volume de dados geocronológicos, possibilitando a subdivisão do Cráton em províncias com características geocronológicas e tectônicas distintas. Entre os modelos de compartimentação tectônica, destacam-se os propostos por Santos (2003) e Tassinari & Macambira (1999,2004). Embora esses modelos apresentem algumas divergências, especialmente nos limites das províncias, eles possuem similaridades na evolução do Cráton Amazônico. Esta evolução envolveu sucessivos episódios de acreção crustal durante o Paleo/Mesoproterozoico, em torno de um núcleo mais antigo de idade arqueana.

Segundo Tassinari & Macambira (1999, 2004), o Cráton Amazônico divide-se em seis províncias geocronológicas (Figura 2A): Amazônia Central ($> 2,3$ Ga), Maroni-Itacaiúnas (2,2 - 1,9 Ga), Ventuari-Tapajós (1,95 - 1,80 Ga), Rio Negro-Juruena (1,80 - 1,55 Ga), Rondoniana-San Ignacio (1,5 - 1,3 Ga) e Sunsás (1,25 - 1,00 Ga). Santos (2003) subdividiu o Cráton em sete províncias geocronológicas: Carajás (3000 - 2500 Ma), Transamazonas (2260 - 1990 Ma), Tapajós-Parima (2030 - 1860 Ma), Amazônia-Central (1900 - 1860 Ma), Rondônia-Juruena (1850 - 1540 Ma), Rio Negro (1820 - 1520 Ma) e Sunsás (1450 - 1000 Ma) (Figura 2B).

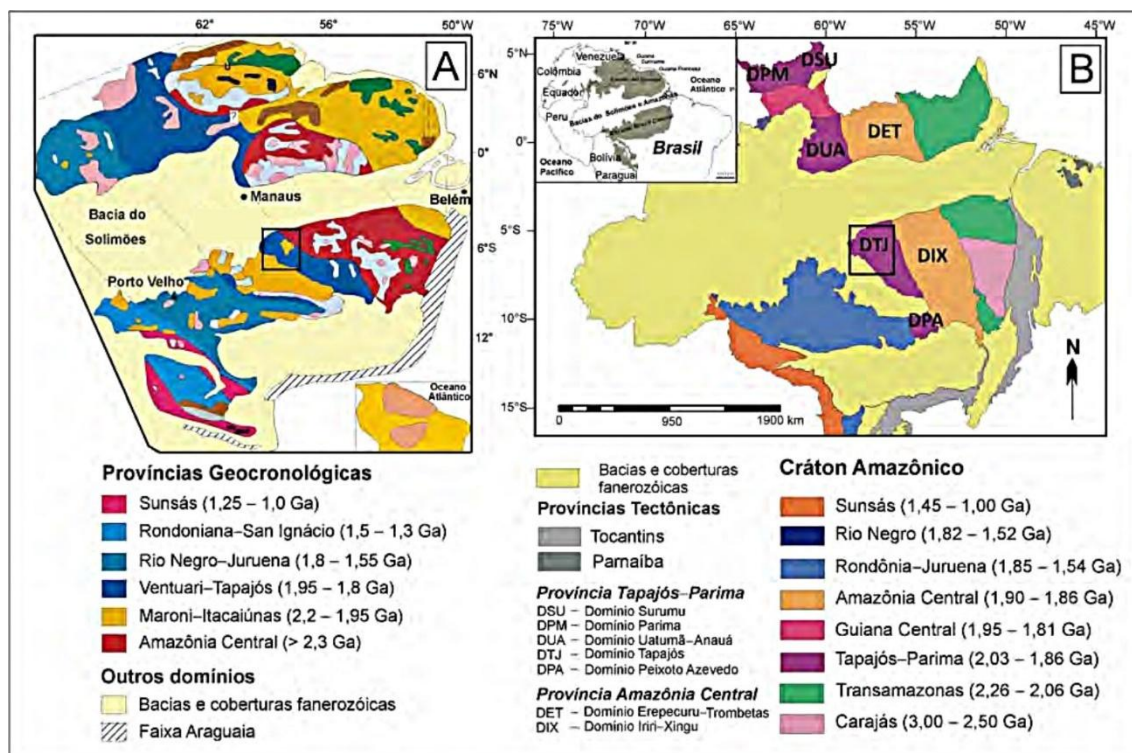


Figura 2- Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico segundo (A) Tassinari & Macambira (1999) e (B) Santos (2003), incluindo os domínios tectônicos das províncias Tapajós-Parima e Amazônia Central (Juliani *et al.* 2014).

3.2 PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS E DOMÍNIO TAPAJÓS

A região de estudo está inserida na Província Tapajós-Parima, a qual foi ampliada por Santos *et al.* (2000) e resultou em geologia composta por embasamento pouco conhecido de rochas vulcânicas félsicas a intermediárias, granitos tipo A, coberturas sedimentares de plataforma, *sills* e diques tholeiíticos (Juliani *et al.* 2014).

A Província Tapajós-Parima foi redefinida por Santos *et al.* (2000) em seus limites espaciais e geocronológicos (2100-1870 Ma). Além disso, essa província apresenta *trend* tectônico NW-SE, é composta de rochas de derivação mantélica relacionadas a um arco magmático, predominando rochas vulcano-plutônicas cálcio-alcálicas (Tassinari & Macambira 1999). Vasquez *et al.* (2008) e Santos (2003) utilizam da subdivisão apresentada por Santos *et al.* (2001) em quatro domínios, que são: Parima e Uaimiri, localizados ao norte da Bacia do Amazonas, e nos domínios Tapajós e Alta Floresta, ao sul da bacia. Todos os domínios apresentam notável metalogenia aurífera, porém destaca-se o Domínio Tapajós (DTJ) por conta de ocorrer como uma das principais áreas auríferas do Brasil, podendo ser até mesmo a maior área garimpeira do país (Vasquez *et al.* 2008). A respeito da evolução geotectônica, foram gerados dois principais modelos: um modelo que envolve acreção de sucessivos arcos magmáticos entre 2050 e 1877 Ma (Santos *et al.*

2000), e outro envolvendo um único arco magmático Orosiriano (Arco Cuiú-Cuiú/Anauá) ($< 2,0$ Ga) e a geração de sucessivos pulsos magmáticos pós-colisionais transcorrentes e extensionais com *underplating* associado, que se estenderam ao estágio pós-orogênico, há cerca de 1,88 Ga (Vasquez *et al.* 2002, 2008, 2017, Juliani *et al.* 2021).

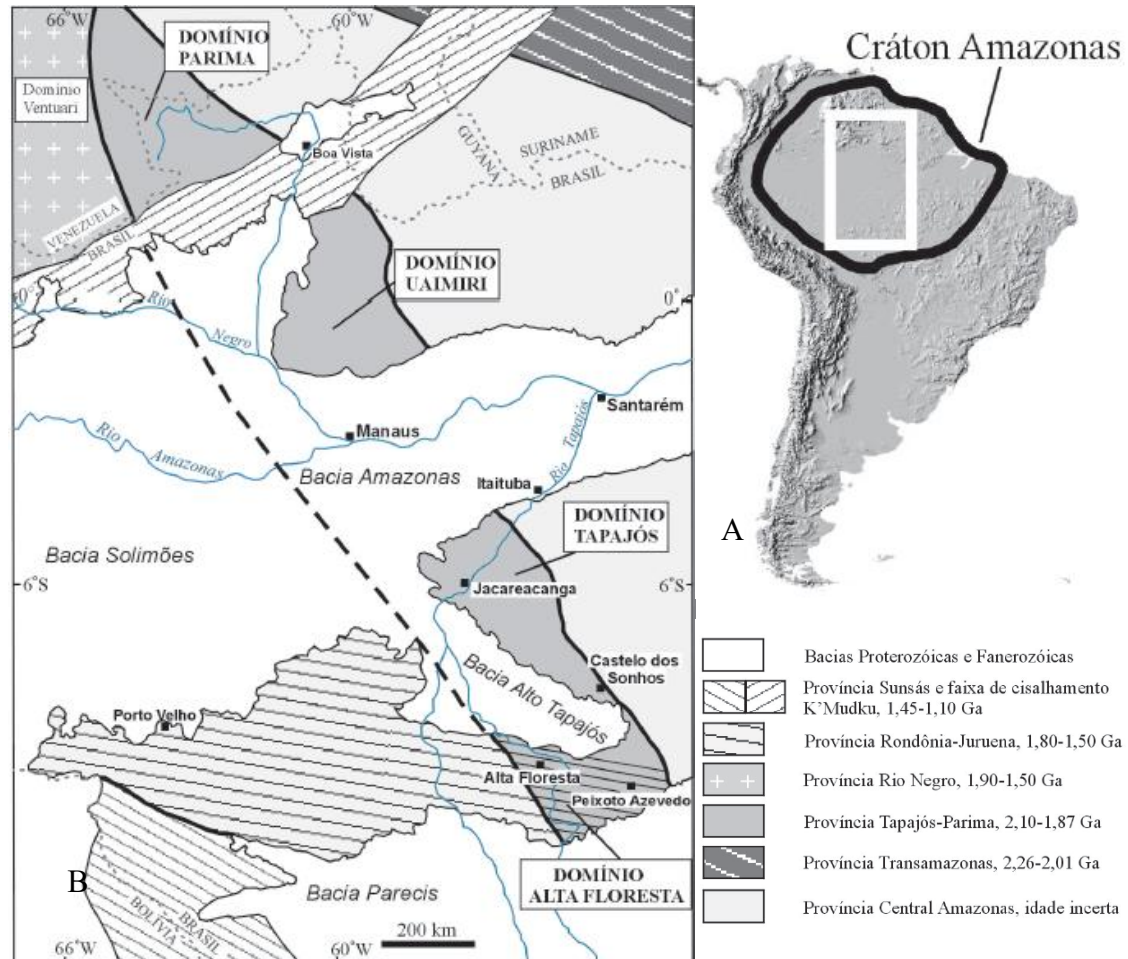


Figura 3- Mapa geológico contextualizando a Província no Cráton Amazonas (A) e os quatro domínios da Província Tapajós-Parima (B) (Santos *et al.* 2003).

O Domínio Tapajós (Figura 4) é um segmento meridional da Província que se apresenta limitado a leste pelo Domínio Iriri-Xingu, recoberto a norte e a sul pelas bacias fanerozoicas do Amazonas e Alto Tapajós, respectivamente; caracteriza-se por apresentar o controle tectônico marcado pela orientação NW-SE da maioria das intrusões ígneas e depósitos vulcânicos mais evoluídos (Vasquez *et al.* 2008, Juliani *et al.* 2014).

As estruturas evidentes no domínio demonstram a evolução tectônica desta porção da província, como por exemplo, a direção preferencial E-W de estruturas ao norte do domínio podem sugerir a estruturação da faixa móvel e da implantação dos arcos magmáticos mais antigos do Cráton. Além disso, as unidades mais antigas aflorantes no domínio, rochas vulcânicas e sedimentares, demonstram deformação influenciada por zonas de cisalhamento dúctil NW-SE com intensidade variável e um metamorfismo variando da fácies xisto-verde a anfibolito, enquanto no restante do domínio a deformação rúptil predomina e demonstra a preservação de níveis crustais mais rasos no sentido nordeste (Almeida *et al.* 2001, Santos *et al.* 2001, Juliani *et al.* 2014).

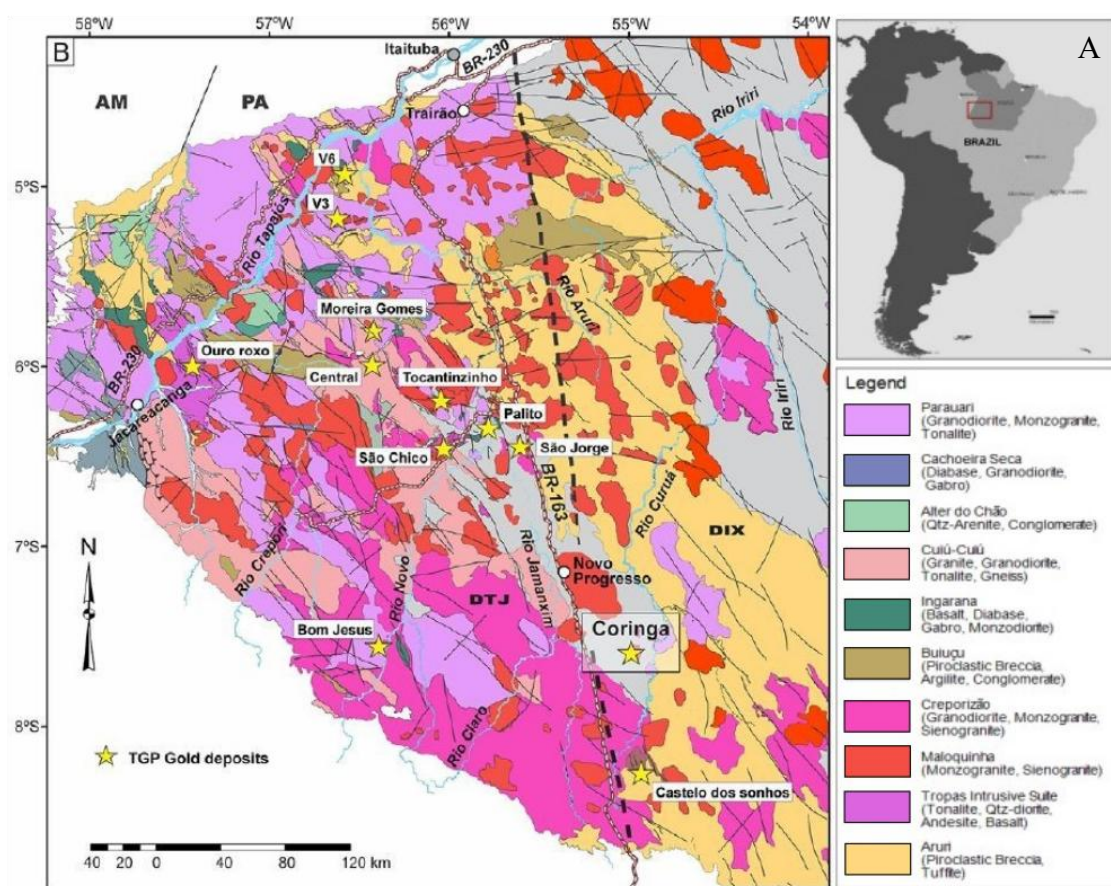


Figura 4- Mapa de localização da Província (A) e mapa geológico do DTJ indicando alguns dos principais depósitos de ouro, com ênfase na área de estudo (B) (Vasquez *et al.* 2008, Lima 2021).

Baseado na ocorrência dos depósitos de interesse deste trabalho, foram selecionadas algumas unidades aflorantes e importantes no contexto do domínio. O **Complexo Cuiú-Cuiú** é a unidade mais antiga aflorante na área de estudo, é uma formação geológica composta predominantemente por ortognaisses e granitoides de composição tonalítica a granodiorítica (Ferreira 2000, Coutinho 2008) com orientação NE-SW predominante e N-S subordinada (Almeida *et al.* 2001), granitoides cálcio-alcalinos pouco evoluídos, configurando sua gênese relacionada à arco magmático associado à subducção de litosfera oceânica, em ambiente arco de ilha (Ferreira *et al.* 2000, Vasquez *et al.* 2002, Santos *et al.* 2004, Juliani *et al.* 2014). Os granitoides na porção SW do domínio apresentam metamorfismo de alto grau, evidenciando inclusive feições de fusão parcial (Ferreira *et al.* 2000), enquanto os da porção noroeste, nordeste e central estão mais preservados e chegam a exibir estruturas ígneas preservadas. A idade dessa unidade foi obtida a partir de zircões com a metodologia U-Pb, encontrando uma idade de 2033 ± 7 Ma e 2005 ± 7 Ma para o Complexo Cuiú-Cuiú (Santos *et al.* 2004).

A **Formação Vila Riozinho** corresponde ao magmatismo posterior à formação do Complexo Cuiú-Cuiú que abrange vulcanismo, variando entre composição riolítica e localmente traquítica, cálcio-alcalino de alto potássio a shoshonítico, com idade de 2000 ± 4 Ma e 1998 ± 3 Ma (Lamarão *et al.* 2002). O evento magmático posterior é intrusivo na Formação Vila Riozinho; trata-se do **Granito São Jorge**, caracterizado pela composição monzogranítica e suas variações, isotrópico e cálcio-alcalino de alto potássio. Além disso, o corpo granítico foi descrito como dois granitos distintos, sendo o primeiro, denominado Granito São Jorge Antigo (GSJA), com idade de 1981 ± 9 Ma e 1981 ± 2 Ma, e o segundo, Granito São Jorge Jovem (GSJJ), com idade de 1891 ± 3 Ma. As datações da Formação Vila Riozinho e os granitos São Jorge Antigo e Jovem foram obtidas a partir da metodologia Pb-Pb em zircões e sugerem contemporaneidade ou pequena diferença de idade entre as unidades (Lamarão *et al.* 2002, Juliani *et al.* 2014).

A **Formação Novo Progresso** também pode mostrar correlação com essas unidades, porém ainda não possui estudos de proveniência (Juliani *et al.* 2014). A unidade está orientada a N-S e é composta por conglomerados com clastos de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas félsicas, arenitos líticos e arcoseanos intercalados com pelitos (Ferreira *et al.* 2000, 2004).

A **Suíte Intrusiva Creporizão** caracteriza-se por seus granitoides miloníticos, cálcio-alcalinos de médio a alto potássio, sin a tardi-transcorrentes e relacionada a um domínio essencialmente orogênico, assim como o Complexo Cuiú-Cuiú (Almeida *et al.*

2001, Vasquez *et al.* 2000). A colocação desses granitos pós-colisionais se deu ao longo de zonas de cisalhamento transcorrentes de direção NW-SE, marcando evento deformacional essencialmente rúptil-dúctil. Entre as datações realizadas neste grupo de rochas, foram obtidas idades entre 1997 ± 5 Ma e 1968 ± 16 , a partir do método Pb-Pb em zircão (Vasquez *et al.* 2000), assim como idades entre 1968 ± 7 Ma e 1963 ± 6 Ma, utilizando o método U-Pb em zircão (Santos *et al.* 2004).

Os processos de cristalização dos granitoides relacionados à Suíte Creporizão forneceram o ambiente propício para a circulação de fluidos hidrotermais, que geraram sistemas complexos de alteração e mineralização (Lamarão *et al.* 2005, Juliani *et al.* 2014).

A **Suíte Intrusiva Parauari**, datada em 1883 ± 2 Ma (Pb-Pb em zircão; Vasquez *et al.* 1999) e 1879 ± 11 Ma (U-Pb em zircão; Santos *et al.* 2000), corresponde a granitoides cálcio-alcalinos de alto potássio com estruturas de caráter predominantemente rúptil e associada com granitos do tipo A, em relação a aspectos espaciais e temporais (Vasquez *et al.* 2002). A colocação desses granitoides, evento magmático mais expressivo do Domínio Tapajós, se deu em contexto extensional intraplaca (Santos *et al.* 2000), podendo relacionar-se com estágio pós-colisional do arco responsável pela colocação da Suíte Intrusiva Tropas, com misturas de magmas mantélicos e da crosta continental, assemelhando-se com modelos de *underplating* (Vasquez *et al.* 2002) ou relacionar-se a arcos magmáticos continentais maduros (Juliani *et al.* 2021). Além disso, a atuação de processos de *underplating* é reforçada por conta da colocação de corpos gabroicos presentes na área de estudo, como o Gabro São Domingos e o Olivina Gabro Rio Novo, os quais são produto da fusão mantélica.

A colocação de granitoides pós-orogênicos é transicional para um regime anorogênico no final do Paleoproterozoico, aproximadamente 1,88 Ga, configurando na formação de unidades como o Grupo Iriri, a Suíte Intrusiva Maloquinha, o Granito Porquinho, etc (Vasquez *et al.* 2000). A partir da reativação das zonas extensionais NW-SE há a colocação de derrames de rochas vulcânicas do Grupo Iriri, de afinidade alcalina (tipo A), as quais são representadas em duas formações, Formação Salustiano, em que predominam riolitos e dacitos, e a Formação Aruri, caracterizada pela presença de rochas piroclásticas ácidas e epiclásticas (Vasquez *et al.* 2008). A **Suíte Intrusiva Maloquinha** é composta por sienogranitos e monzogranitos e suas variações em que se caracterizam como rochas alcalinas do tipo A, metaluminosas a peralcalinas, orientadas nas direções NW-SE a N-S. Mostram características de colocação em ambiente extensional

intracontinental (Vasquez *et al.* 2002, Lamarão *et al.* 2002). O granito Porquinho é um plúton mineralizado com Sn, Nb e Ta semelhante à composição da Suíte Intrusiva Maloquinha, porém apresenta idade de 1786 ± 14 (U-Pb em zircão; Santos *et al.* 2004). As unidades mais antigas são recobertas por unidades cenozoicas, representadas por sedimentos detríticos, lateríticos e aluvionares inconsolidados (Almeida *et al.* 2001).

Tabela 1- Síntese dados geocronológicos das unidades da Província Tapajós associadas aos depósitos estudados.

Associações	Unidades Litoestratigráficas	Idade de Formação/ Fontes Detriticas (Ma)	Método
Orosiriano Vulcano- Plutonismo Paleoproterozoico	Suíte Intrusiva Maloquinha	1880 ± 9^0 ; 1882 ± 4^1	Pb-Pbzr
	Grupo Iriri	1888 ± 6^2 ; 1888 ± 2^3	Pb-Pbzr
	Suíte Intrusiva Parauari	1879 ± 11^4 1883 ± 2^5	U-Pb T zr Pb-Pbzr
	Granito São Jorge Jovem*	1891 ± 3^0	Pb-Pbzr
	Granito São Jorge Antigo*	1983 ± 8 ; 1981 ± 2^0	Pb-Pbzr
	Granito São Chico	1891 ± 11^9	U-Pbzr
	Suíte Intrusiva Creporizão	1968 ± 7 ; 1963 ± 6^6 1984 ± 1 ; 1968 ± 16^5 1987 ± 5^7	U-Pb S zr Pb-Pbzr Pb-Pbzr
	Granito Tocantinzinho*	1993 ± 12 ; 1985 ± 11^8	U-Pb S zr
	Formação Vila Riozinho	1998 ± 3 ; 2000 ± 4^7 2002 ± 4^0	Pb-Pbzr
Embasamento	Complexo Cuiú-Cuiú	2016 ± 3 , 2014 ± 6 , 2010 ± 4^7 2033 ± 7 , 2016 ± 5 , 2015 ± 9 , 2012 ± 8 , 2005 ± 7^4 2011 ± 23^6	Pb-Pbzr U-Pb S zr U-Pb T zr

Abreviaturas: S – SHRIMP; T. ID-TIMS; zr. zircão; * denominação usada exclusivamente pelos autores. Referências: 0 – Lamarão *et al.* (2002), 1 - Vasquez *et al.* (1999), 2 – Moura *et al.* (1999), 3 – Dall’Agnol *et al.* (1999), 4 – Santos *et al.* (2000), 5 – Vasquez *et al.* (2000), 6 – Santos *et al.* (2001), 7 – Vasquez *et al.* (2017), 8 – Borgo *et al.* (2017), 9 – Pereira (2017).

4 DEPÓSITOS AURÍFEROS DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS

A metalogênese da Província Tapajós é diversa e está amplamente associada ao magmatismo granitoide em tectonismo de margem convergente, possibilitando a geração de depósitos dos tipos: a) relacionados à intrusão/magmático-hidrotermais, b) pórfiros, c) epitermais (high- e low-sulfidation) e d) orogênicos (Juliani *et al.* 2021, Lima *et al.* 2023, Vasquez *et al.* 2024).

Os depósitos orogênicos concentram-se na porção sudoeste da província, coincidindo com as rochas mais antigas e mais deformadas. Alguns autores apontam dois eventos distintos na formação desse tipo de depósito, sendo o primeiro a partir de uma zona de transcorrência de 1,97-1,95 Ga que forma os depósitos mesotermiais (>5 km de profundidade) e o segundo, a partir de zonas de falhas rúpteis de 1,89-1,86 Ga que formam depósitos relacionados à intrusão (Klein *et al.* 2002, Villas *et al.* 2013, Juliani *et al.* 2014). Assim, as unidades geológicas associadas a esses tipos de depósitos são as seguintes: o Complexo Cuiú-Cuiú, o Grupo Jacareacanga, a Suíte Intrusiva Creporizão e as estruturas NW-SE que as afetam (Silva *et al.* 2002, Klein *et al.* 2002).

Os depósitos magmático-hidrotermais são predominantes na Província, os quais se alinham em relação a um lineamento com orientação NW-SE, como: Tocantinzinho, São Jorge, Palito, Bom Jardim, Cuiú-Cuiú e Batalha (Juliani *et al.* 2014). Geologicamente, são relacionados ao primeiro evento a Suíte Intrusiva Creporizão, por volta de 2,0 Ga, que envolve as intrusões do depósito Tocantinzinho e da Formação Vila Riozinho. O evento seguinte está relacionado ao evento Uatumã e às fases intrusivas do evento Parauari, por volta de 1,88 Ga em que se formaram as mineralizações do Granito Batalha, high-sulfidation do V3 e do tipo pórfiro do Palito (Silva *et al.* 2002, Lamarão *et al.* 2005, Misas 2010, Santiago *et al.* 2012, Juliani *et al.* 2014, Bouzari *et al.* 2016).

Entre os depósitos auríferos relacionados a corpos graníticos paleoproterozoicos, foi dada ênfase a dois depósitos neste trabalho: São Jorge e São Chico. Estes depósitos estão relativamente próximos, dispostos no limite entre os municípios de Itaituba e Novo Progresso, no oeste do Estado (Figura 5). O acesso a eles ocorre por meio rodoviário, principalmente pelas rodovias BR-230 e BR-163 (Figura 1).

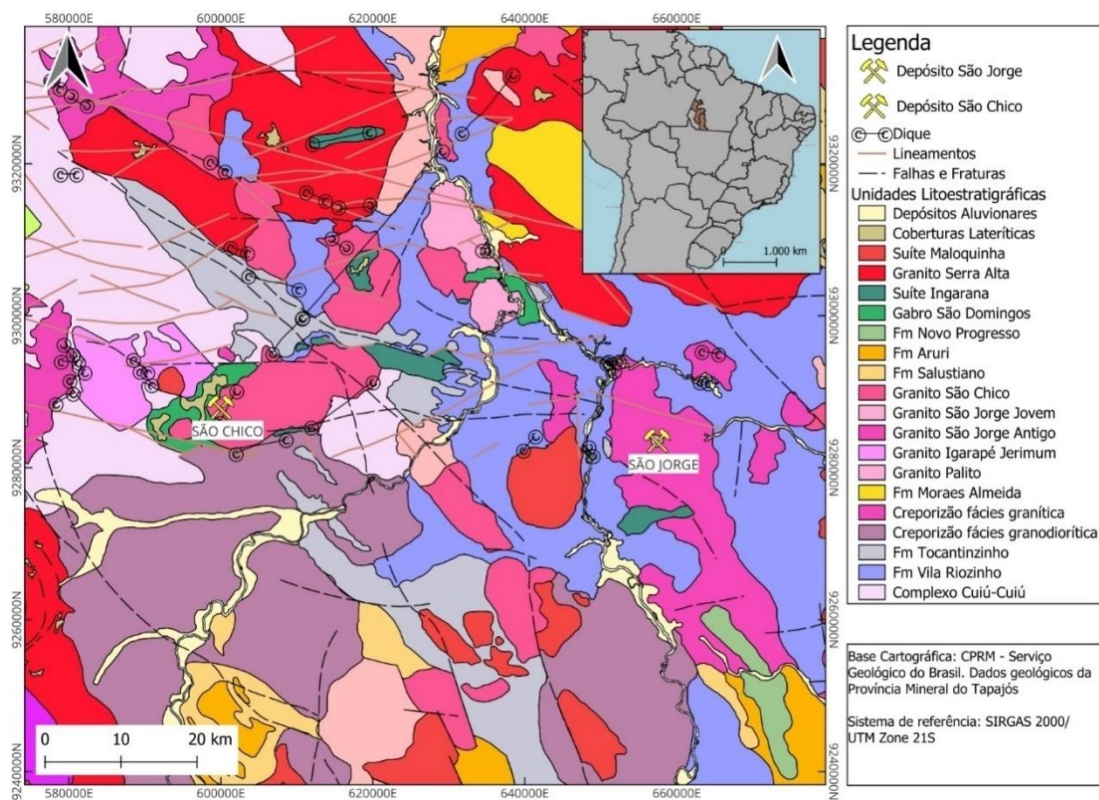


Figura 5- Mapa Geológico com ênfase em unidades associadas aos depósitos São Jorge e São Chico.

Geologicamente, os dois depósitos estão inseridos no Domínio Tocantinzinho, onde os depósitos auríferos acompanham o Lineamento Tocantinzinho. ODSJ e o DSC apresentam mineralizações associadas à alteração hidrotermal, estilos em stockwork e disseminada, que podem ter influência significativa na composição dos minerais acessórios ou serem influenciados pelos fluidos hidrotermais. Sotero *et al.* (2015) descrevem que a associação do ouro com minerais de Ag, Te, Se, Bi e Hg é comum nos depósitos da região.

4.1 DEPÓSITO SÃO JORGE

O depósito São Jorge (DSJ) ocorre próximo ao limite a leste do domínio Tapajós (Figura 4), e suas mineralizações estão associadas aos veios de quartzo, contendo ouro e sulfetos, com espessura de 2 a 20 cm e segue a orientação NW-SE da zona de cisalhamento (Vasquez *et al.* 2008).

A mineralização do depósito São Jorge está hospedada no granito cálcio-alcalino São Jorge Jovem (GSJJ), classificado predominantemente como um anfibólio-biotita-monzogranito (Borges *et al.* 2009), ocorrendo em subsuperfície na zona mineralizada e em exposições localizadas em superfície. A rocha onde o depósito está hospedado foi

caracterizada geoquimicamente por Lamarão *et al.* (2002) com altos teores de Ba e Sr, bem como padrões de ETR semelhantes aos de granitos *shoshoníticos*, apesar de serem menos potássicos (Vasquez *et al.* 2024).

O ouro ocorre associado à pirita, incluso ou em fraturas, sendo este o sulfeto predominante na zona mineralizada, porém é acompanhado por outros sulfetos, como a calcopirita, esfalerita, galena e molibdenita, os quais preenchem fraturas de até 20 mm de espessura acompanhados de quartzo, clorita e carbonatos, ou de forma disseminada na rocha hospedeira (Borges *et al.* 2009). O GSJJ, intrusivo na Suíte Intrusiva Creporizão, foi datado por Lamarão *et al.* (2002) pelo método Pb-Pb em zircão e apresentou idade de 1891 ± 3 Ma, enquanto a mineralização forneceu idade de 1700 Ma, a partir da datação de pirita pelo método de Pb-Pb (Vasquez *et al.* 2024).

Baseado na descrição petrográfica feita por Borges *et al.* (2009), a qual caracterizou os processos hidrotermais que afetaram o Granito São Jorge, foram descritas quatro associações minerais que representam os estágios de evolução da rocha hospedeira (Figura 6). Na **Associação 1**, os autores descrevem a rocha como um anfibólio-biotita-monzogranito isotrópico, com grau de alteração menor em relação às outras e isenta de mineralização; corresponde ao estágio que mais se aproxima da rocha formada em condições magmáticas, apesar de apresentar leve alteração nos anfibólios, biotitas e plagioclásios.

A **Associação 2**, considerada como correspondente ao estágio de alteração pós-magmática precoce, apresenta grau de alteração mais avançado, sendo evidente a substituição do anfibólio por clorita + carbonato + óxido de Fe e Ti + titanita $\pm$ biotita $\pm$ epidoto, bem como a parcial cloritização da biotita e saussuritização do plagioclásio, mantendo sua textura ígnea preservada. Neste estágio, os minerais acessórios como a titanita e os opacos apresentam-se preservados.

Na **Associação 3**, o estágio de alteração propilítica é marcado pela destabilização do epidoto, assim como o anfibólio e a biotita apresentam-se inteiramente pseudomorfizados e com alteração clorítica evidente, o plagioclásio evidencia processo de descalcificação e substituição por mica branca e carbonatos. Neste estágio, titanita, magnetita e ilmenita passam a ser substituídas por minerais opacos e apresentam corrosão, sendo o início dos processos hidrotermais que geraram a mineralização dos granitos.

A **Associação 4** representa a porção mais alterada do granito (Figura 5), sendo este o estágio de alteração sericítica (sericita + carbonatos + pirita $\pm$ clorita $\pm$ biotita); está

associada às principais zonas mineralizadas em sulfetos. O intenso processo de descalcificação e reorganização do plagioclásio resultou em plagioclásio de composição albitica com forte impregnação de carbonato e mica branca; o mesmo pode ser observado em relação ao feldspato potássico. Desse modo, essa associação caracteriza-se por uma composição dominante de micas brancas, carbonatos e pirita, bem como a ausência do epidoto, o qual foi desestabilizado por processos hidrotermais de baixa temperatura. Por fim, para melhor definição, este grupo foi dividido no subtipo 4A, com proporções expressivas de biotita verde clara em associação com micas brancas e carbonatos, e o subtipo 4B, enriquecido em clorita (Borges *et al.* 2009).

Considerando as condições físico-químicas para formação da mineralização, Borges *et al.* (2009) sugerem temperaturas de 300 ± 40 °C, pressões em torno de 1kbar e condições oxidantes. O transporte e a deposição dos sulfetos e do ouro tiveram grande contribuição de fluido rico em CO₂ e metais, o qual foi responsável pela desestabilização do epidoto, sendo essas interações da rocha com o fluido hidrotermal responsáveis por concentrar a mineralização nas zonas mais alteradas e distinguir duas gerações de mineralizações: na primeira, o ouro é mais enriquecido em Ag e ocorre preenchendo fraturas na pirita; na segunda, o ouro é mais enriquecido em Te e ocorre associado ao quartzo, à esfalerita e à calcopirita (Borges *et al.* 2009, Sotero *et al.* 2015, Vasquez *et al.* 2024).

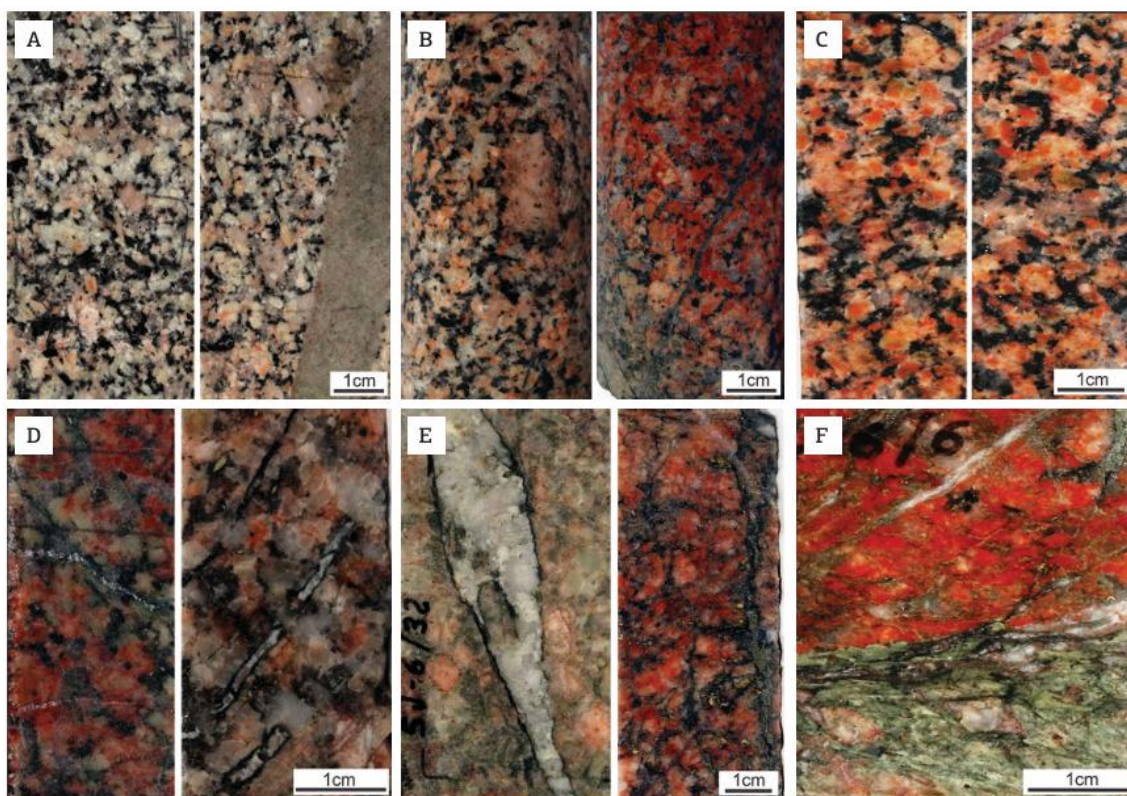


Figura 6- Imagens macroscópicas de amostras dos furos de sondagem do Granito São Jorge Jovem, correspondentes às associações minerais de Borges *et al.* (2009). (A) Associação 1 - rocha granítica com textura ígnea preservada e presença de veios aplíticos de espessura centimétrica; (B e C) Associação 2 - rocha pouco alterada com coloração mais avermelhada; (D) Associação 3 - rocha hidrotermalizada, contendo vênulas e veios de quartzo, pobremente mineralizada; (E e F) Associação 4 - rocha intensamente hidrotermalizada/mineralizada, com porções avermelhadas ou esverdeadas, cortada por veios centimétricos de quartzo.

Sotero *et al.* (2015) demonstraram que o ouro ocorre incluso em pirita e esfalerita, preenchendo fraturas ou associado a cristais de quartzo hidrotermal e carbonatos. Santiago (2012) e Vasquez *et al.* (2024) sugerem reavaliação que evidencia que a mineralização se concentra em zonas de alteração sericítica.

O modelo genético proposto na literatura pela maioria dos autores para o depósito São Jorge é de um depósito tipo IRGS, devido a sua formação sob baixa pressão e associado a uma deformação dúctil-rúptil. É possível considerar o sistema do tipo pórfiro, visto que o estilo da mineralização é disseminado e hospedado em granitoides; contudo, entre a assembleia de alterações hidrotermais, a alteração potássica está ausente (Santos *et al.* 2001, Dall'Agnol *et al.* 2003, Borges *et al.* 2009).

Associações Mineralis	Associação 1: Magmática	Associação 2: Magmática Modificada	Associação 3: Hidrotermal	Associação 4: Hidrotermal Mineralizada
Sequência dos estágios evolutivos	Estágio magmático	Estágio de alteração pós-magmática precoce	Estágio de alteração propilitica	Estágio de alteração filica
Quartzo				Silicificação
Feldspato potássico				
Plagioclásio (And-Olig)				
Plagioclásio (descalcificado ou reordenado)				
Anfíbólio				
Biotita 1				
Biotita 2				
Biotita 3				
Titanita				
Magnetita				
Ilmenita				
Zircão				
Apatita				
Epidoto		Saussuritização		
Clorita			Cloritização	
Carbonatos				Carbonatação
Mica branca				Sericitização
Pirita				Sulfetação
Temperatura estimada	$\geq 700^{\circ}\text{C}$	$450 - 350^{\circ}\text{C}$	$340 - 280^{\circ}\text{C}$	$\leq 300^{\circ}\text{C}$
Marcadores mineralógicos	Hornblenda + Plag. (And-Olig)	Biotita 1 + Epidoto	Clorita + Plag. descalcif. + Biotita 2	Mica branca + Carbonatos + Pirita + Biotita 3 + Clorita
Estilo de alteração		Não penetrativo	Pervasivo	Pervasivo a fissural

— Principal estágio de formação - - - - Estável Parcialmente alterada - - - - ➔ Evento de alteração superimposto

Figura 7- Principais associações mineralis representativas dos diferentes estágios de evolução das rochas do depósito São Jorge (Borges *et al.* 2009).

4.2 DEPÓSITO SÃO CHICO

O Depósito de Ouro São Chico, atualmente operado pela empresa Serabi Gold, está localizado na Vila São Chico, a aproximadamente 220 km ao sul de Itaituba-PA (Figura 4). Geologicamente, o depósito está associado ao Granito São Chico que intrudiu em granitoides da Suíte Intrusiva Creporizão (SIC). Este depósito encontra-se associado a rochas graníticas classificadas como Hb-granodioritos, Hb-monzonitos e Bt-sienogranitos, inequigranulares médios a grossos, leucocráticos, localmente com textura porfírica e isento de feições de deformação (Pereira 2017, Vasquez *et al.* 2017a, 2017b, 2023, Lima *et al.* 2023).

Pereira (2017) caracterizou a rocha hospedeira com assinatura cálcio-alcaina de alto-K, caráter metaluminoso a peraluminoso, padrão multielementar relativamente similar, assim como enriquecimento dos elementos terras raras leves (ETRL) em relação aos pesados (ETRP), com idade de 1891 ± 11 Ma obtida a partir do método U-Pb em zircão. Além disso, o autor sugeriu, a partir de dados geoquímicos, que as rochas se formaram em um contexto geotectônico convergente transicionando para um contexto extensional intracontinental, os quais geraram rochas das unidades envolvidas, como o

Complexo Cuiú-Cuiú (CC), a Suíte Intrusiva Parauarí (SIP) e a Suíte Intrusiva Creporizão (SIC).

A mineralização está concentrada em veios lenticulares de quartzo e sulfeto subparalelos com espessura de até 3 metros e com orientação WNW-ESE, no estilo *stockwork*. Esses veios apresentam-se envoltos por halos de clorita, sericita e pirita, bem como, alteração propilitica pervasiva em zonas mais distais (Vasquez *et al.* 2017b, Lima *et al.* 2023). A partir do metassomatismo, ocorreu a substituição do feldspato potássico ígneo por hidrotermal hematitizado, formando a adularia nos veios de quartzo com sericita e sulfetos (Lima *et al.* 2023, Vasquez *et al.* 2024).

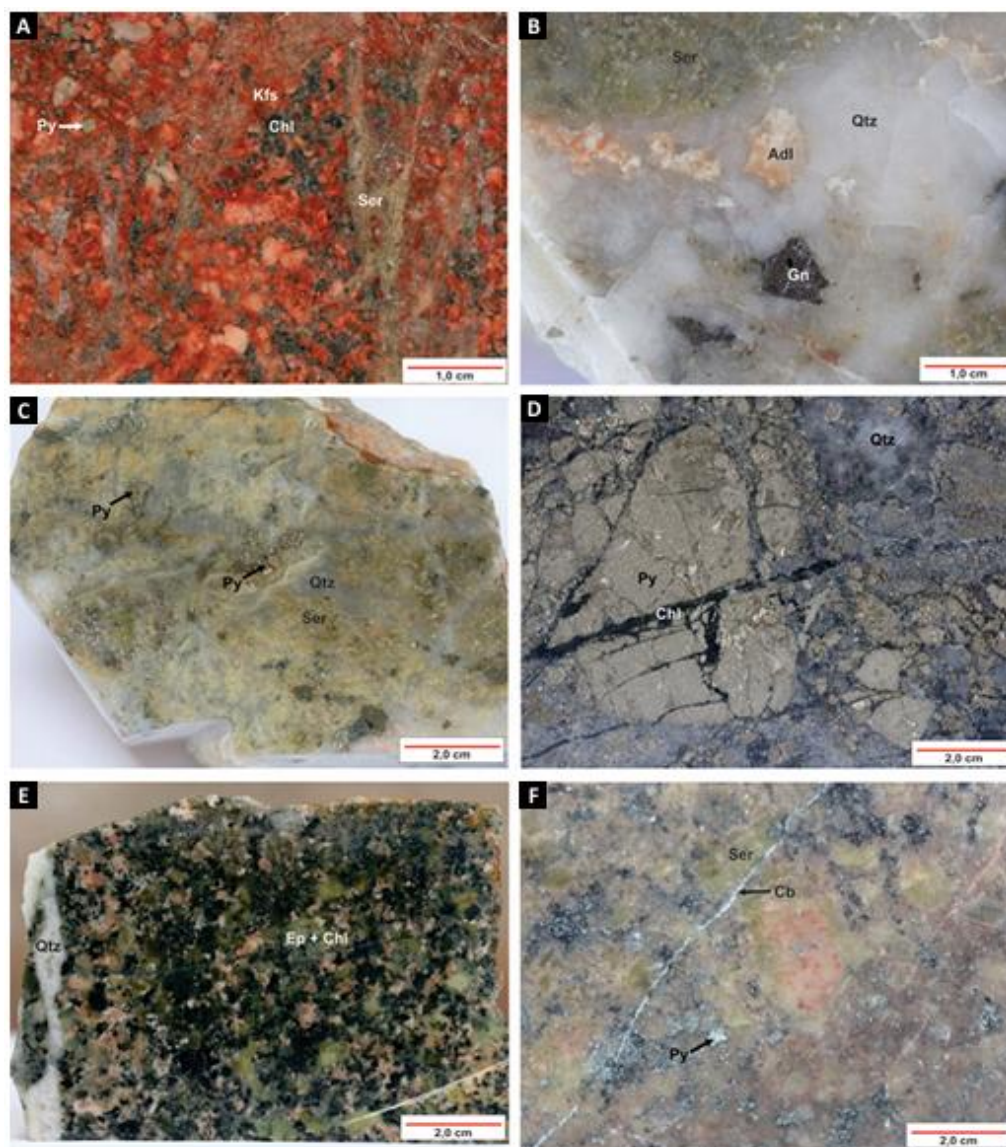


Figura 8- Alteração hidrotermal e mineralização do depósito São Chico. A) Granito hospedeiro com feldspato potássico (Kfs) hidrotermal hematitizado, agregados de clorita (Chl), vênulas de sericita (Ser) e pirita (Py) disseminada. B) Veio de quartzo (Qtz) com adularia (Adl) e galena (Gn) e envelope de sericita na margem. C) Envelope de sericita e quartzo com pirita em agregados. D) Vênula de clorita cortando pirita em veio de quartzo. E) Propilitização de granito com substituição de minerais máficos por clorita e epidoto (Ep) e cortado por vênulas de quartzo tardias com textura em pente. F) Vênula de carbonato (Cb) cortando granito sericitizado e com pirita. Fonte: Vasquez *et al.* (2024).

Os principais sulfetos associados à mineralização de ouro são: pirita + galena + esfalerita $\pm$ calcopirita que ocorrem preenchendo espaços em veios de quartzo ou inclusos em cristais de pirita e esfalerita. Vasquez *et al.* (2017a) apresentaram uma descrição dos sulfetos dispostos em veio de quartzo sulfetado, em que demonstram o predomínio de uma geração de pirita euédrica a subédrica envolta por esfalerita e galena subédrica a anédrica, associando-as à partículas anédricas de uma liga de ouro e prata. Além disso, a mineralização está associada a ganga composta principalmente por albita, feldspato potássico e clorita.

Caracterizado em relatório técnico da empresa como parte de um sistema mesotermal polimetálico hospedado em zonas de falha, possivelmente relacionado a pórfiros, esse tipo de sistema mostra forte controle estrutural, com fluidos hidrotermais geneticamente associados a centros intrusivos e ao evento de mineralização de aproximadamente 1860 Ma (datação em galena pelo método Pb-Pb; Santos *et al.* 2001, Lafon & Coutinho 2008, Vasquez *et al.* 2017b). A mineralização de alto teor está relacionada às rochas granodioríticas com zonas de cloritização e seritização sobrepostas pela geração de sulfetos (pirita, galena, esfalerita e calcopirita (Vasquez *et al.* 2017a).

Lima *et al.* (2023), baseados em estudos de inclusão fluida em cristais de quartzo, sugerem condições da gênese do depósito que permitem inferir um sistema pórfiro como modelo deste depósito. Entre as informações, destacam-se: os fluidos envolvidos na formação dos veios mineralizados são predominantemente aquosos, de baixa salinidade (4,3 a 9,6% equiv. de NaCl) e aprisionados entre 256 e 403°C, além da presença de adulária e texturas de ebulição (*boiling*) nos veios de quartzo, apontados como responsáveis pela formação dos veios mineralizados.

5 RESULTADOS

5.1 PETROGRAFIA

5.1.1 Granito São Jorge Jovem (GSJJ)

O GSJJ, hospedeiro do depósito de ouro São Jorge, foi classificado como um anfibólio-biotita monzogranito isotrópico (Borges *et al.* 2009). Suas rochas mais preservadas e com menor grau de alteração, incluídas na Associação 1 (Figura 9A -D), apresentam leves alterações mineralógicas e na morfologia dos cristais em comparação com as rochas do estágio mais avançado de alteração hidrotermal (Associação 4), onde predominam cristais euédricos de sulfeto, quartzo e carbonato (Figuras 9E - F).

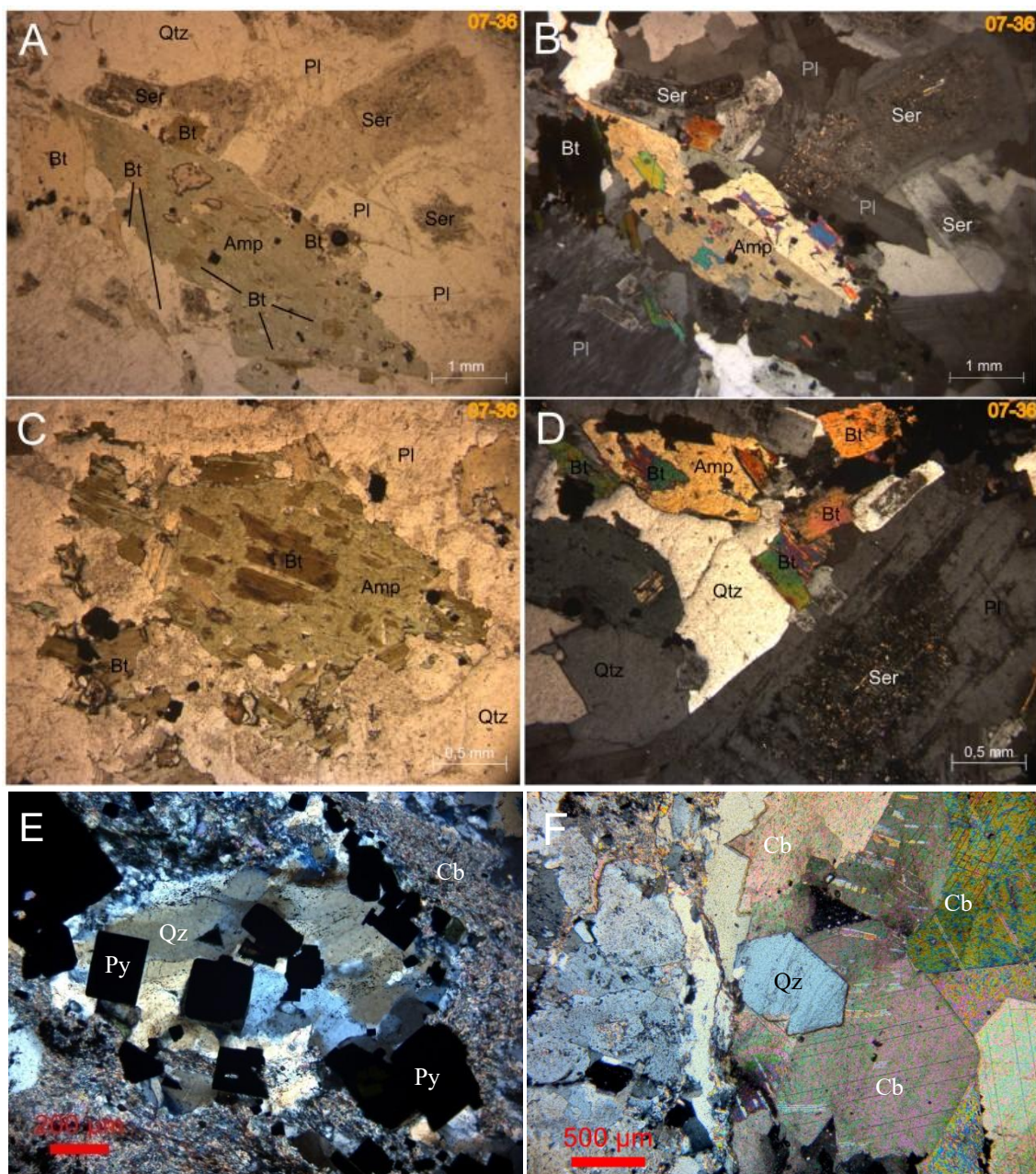


Figura 9- Aspectos petrográficos do GSJJ, hospedeiro do depósito São Jorge. Associações 1: cristais de anfibólio, biotita e plagioclásio bem preservados, porém com leve alteração para biotita, clorita e sericita, respectivamente (A-D). Associação 4: cristais euédricos de pirita, quartzo e carbonatos (E-F). Qtz: quartzo; Py: pirita; Cb: carbonato. Ser: sericita; Amp: anfibólio; Bt: biotita.

Cristais de apatita da Associação 1 (zona menos alterada e estéril do depósito) são predominantemente euédricos a subédricos, mais desenvolvidos e comumente associados ou inclusos em cristais de anfibólio e biotita (Figura 10A-D). Associam-se, ainda, a quartzo, feldspatos ou aparecem inclusos ou associados a cristais de titanita, zircão e magnetita (Figura 10E e F).

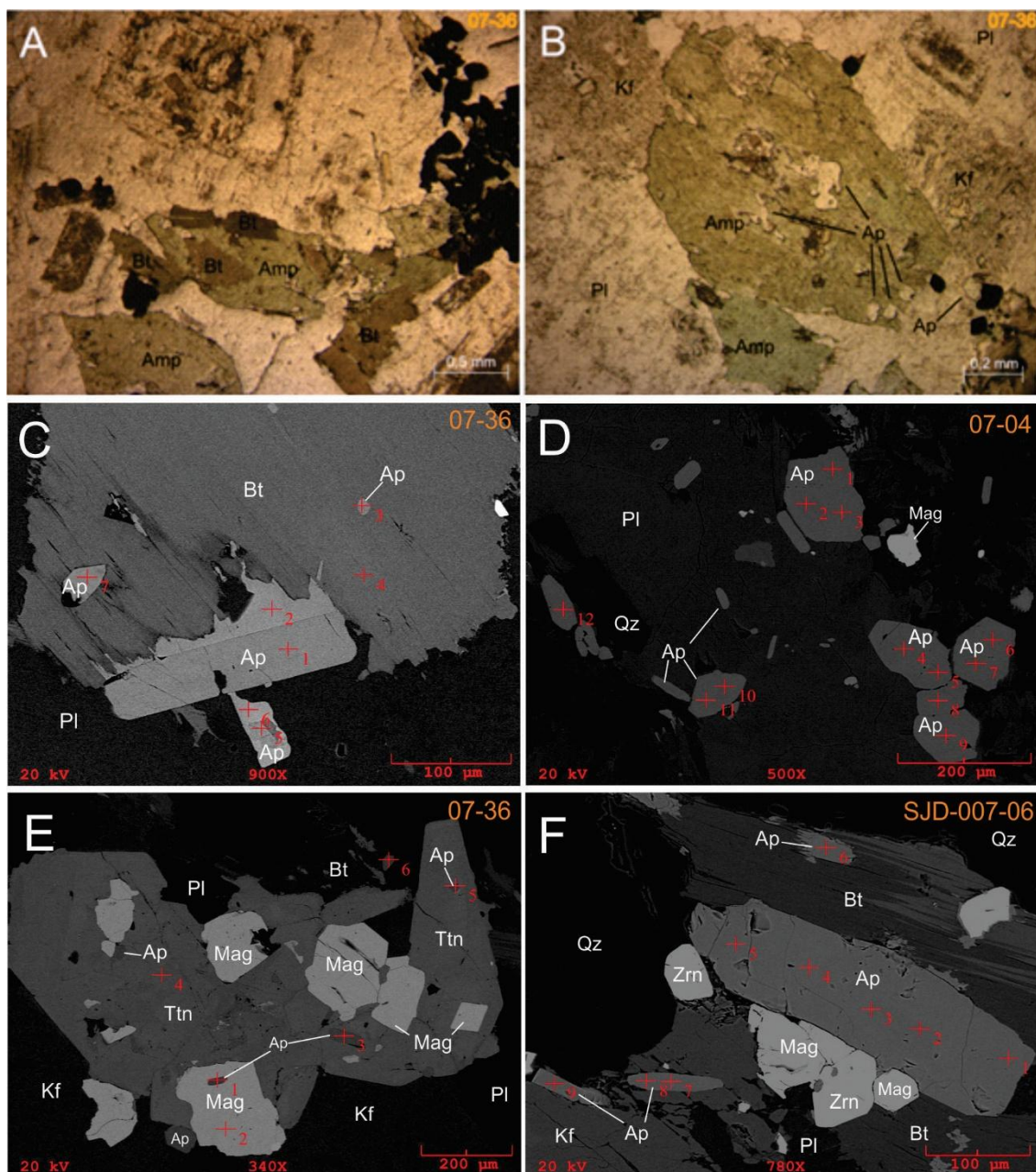


Figura 10- Cristais de apatita da zona não mineralizada (Associação 1) inclusos predominantemente em biotita e anfibólio, associados a cristais de quartzo e feldspato (A-D) ou a cristais de titanita, zircão e magnetita (E-F). A e B: imagens de luz transmitida. C a F: imagens de elétrons retroespalhados. Cruz vermelha: pontos analisados. Ap: apatita; Bt: biotita; Kf: feldspato potássico; Qz: quartzo; Pl: plagioclásio; Mag: magnetita; Zrn: zircão; Ttn: titanita.

Nas zonas mineralizadas do depósito e com grau de alteração mais elevado (Associação 4), a rocha registra processos hidrotermais mais intensos, incluindo saussuritização, cloritização, sericitização, carbonatação, silicificação e sulfetação. Neste estágio, a apatita aparece com formas anédricas, corroídas, comumente associada ou incluída em cristais de pirita, sulfeto mais abundante (Figuras 11).

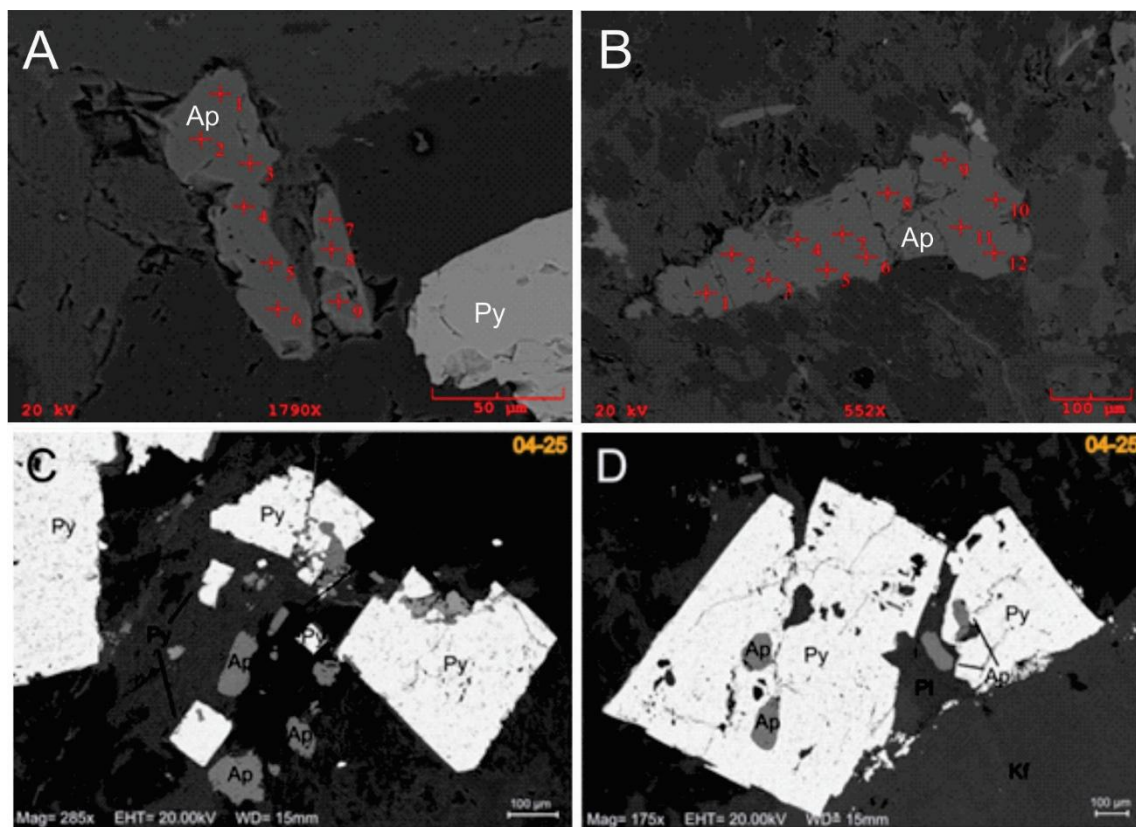


Figura 11- Imagens de ERE de cristais anédricos e corroídos de apatita (Ap) da zona mineralizada (Associação 4) ou inclusos e associados a cristais de pirita (Py). Cruz vermelha: pontos analisados.

5.1.2 Granito São Chico (GSC)

O GSC, hospedeiro do depósito São Chico, é classificado como um biotita monzogranito isotrópico, com feições de alterações hidrotermais marcando os eventos de mineralização, a qual concentra-se em veios de quartzo e sulfetos. As fácies sem mineralização apresentam alteração potássica (Figura 12A), onde os cristais de plagioclásio adquirem uma cobertura de coloração castanho-avermelhada e um aspecto “turvo” que pode atingir todo o cristal. A coloração avermelhada, bem observada macroscopicamente na rocha, é resultado da presença de concentrações sub-microscópicas de hematita inclusa no feldspato potássico hidrotermal (cf. Stabile Jr. 2012).

Nessa porção pode ocorrer superposição de veios de alteração carbonática tardia (Figuras 12B e C), além de exibir porções com a biotita em estágio inicial de alteração clorítica (Figura 12D).

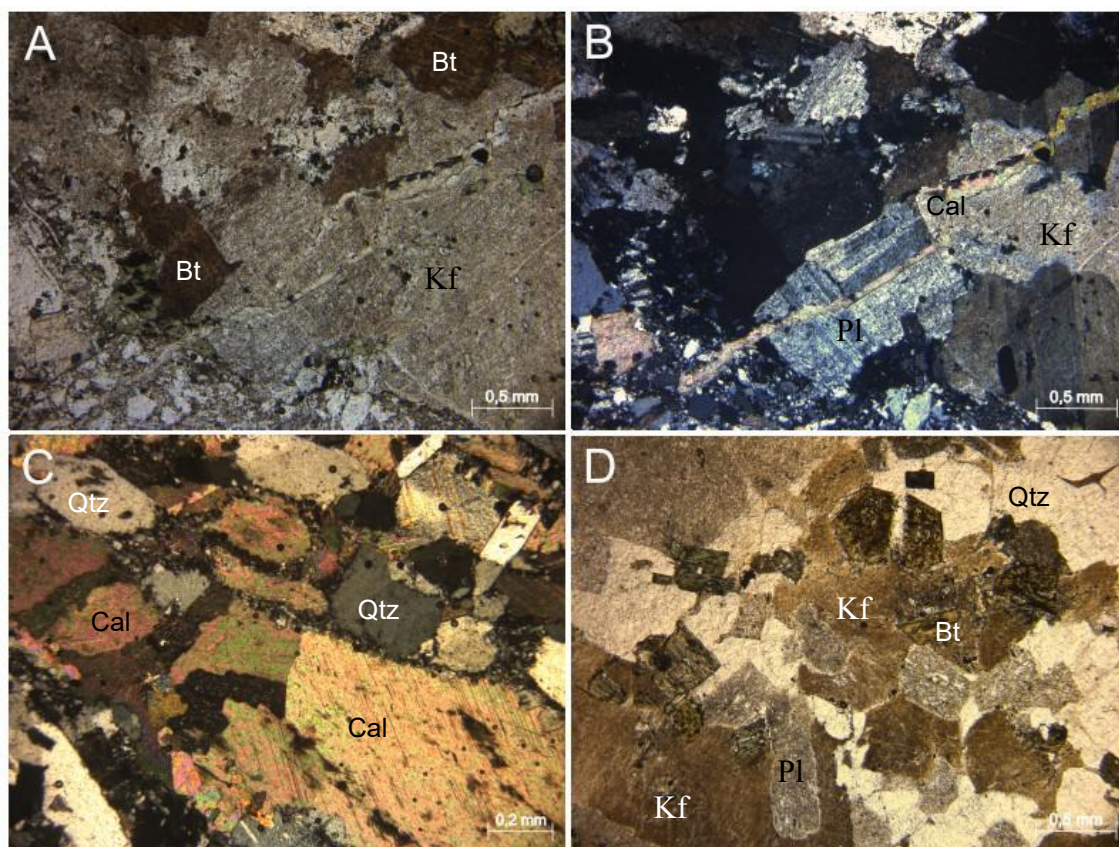


Figura 12- Biotita monzogranito com alteração potássica acentuada, alterando cristais de feldspato (A) e com superposição de vênulas tardias de carbonato e quartzo (B e C). A biotita ainda tem algumas feições preservadas, mas já está no estágio inicial de alteração para clorita (D).

A Figura 13 mostra alterações potássica e clorítica avançadas para uma alteração sericítica do plagioclásio, sendo esta porção transicional das zonas distais aos veios mineralizados para a zona com sulfetos e ouro.

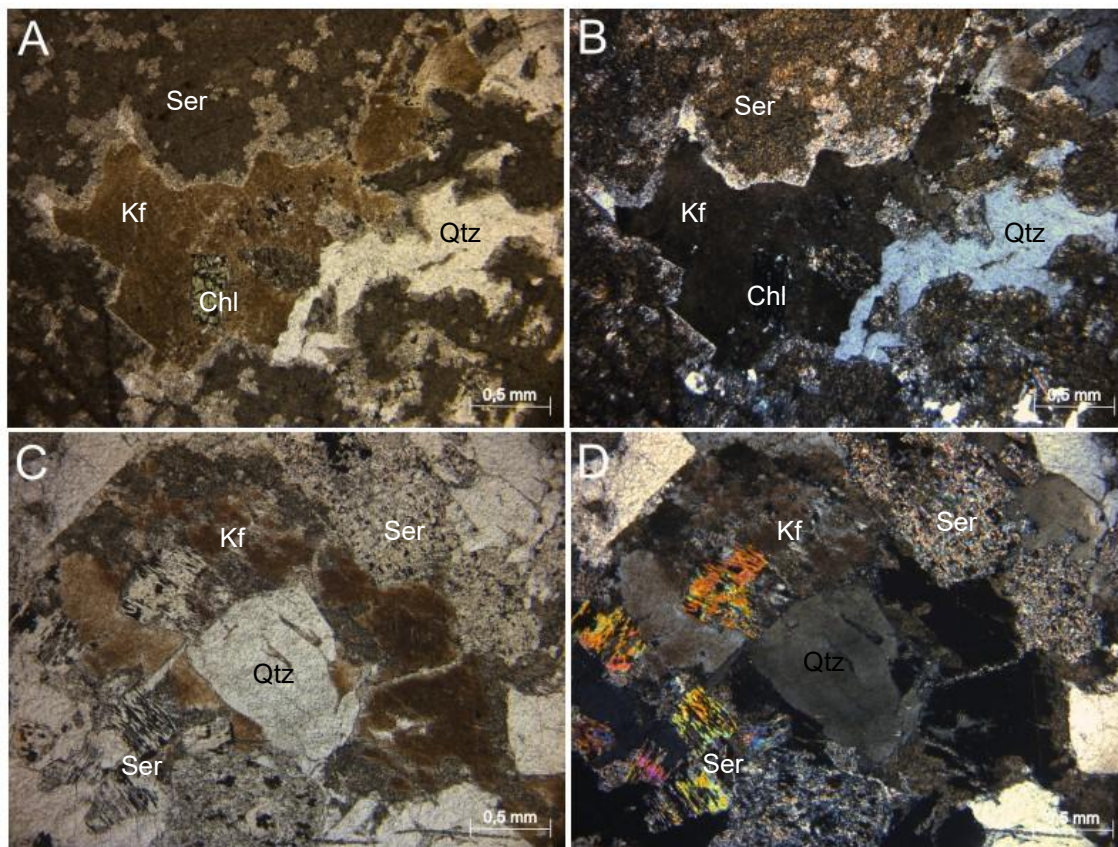


Figura 13- Biotita monzogranito com alteração potássica e clorítica avançadas (A-B), com alteração sericítica moderada (C-D), evidenciando a zona transicional para zona mineralizada (não mostrada).

A partir do avanço da alteração hidrotermal e com maior proximidade dos veios contendo mineralização de ouro, nota-se o desenvolvimento de alteração sericítica onde predominam cristais de quartzo e sulfetos (Figura 14).

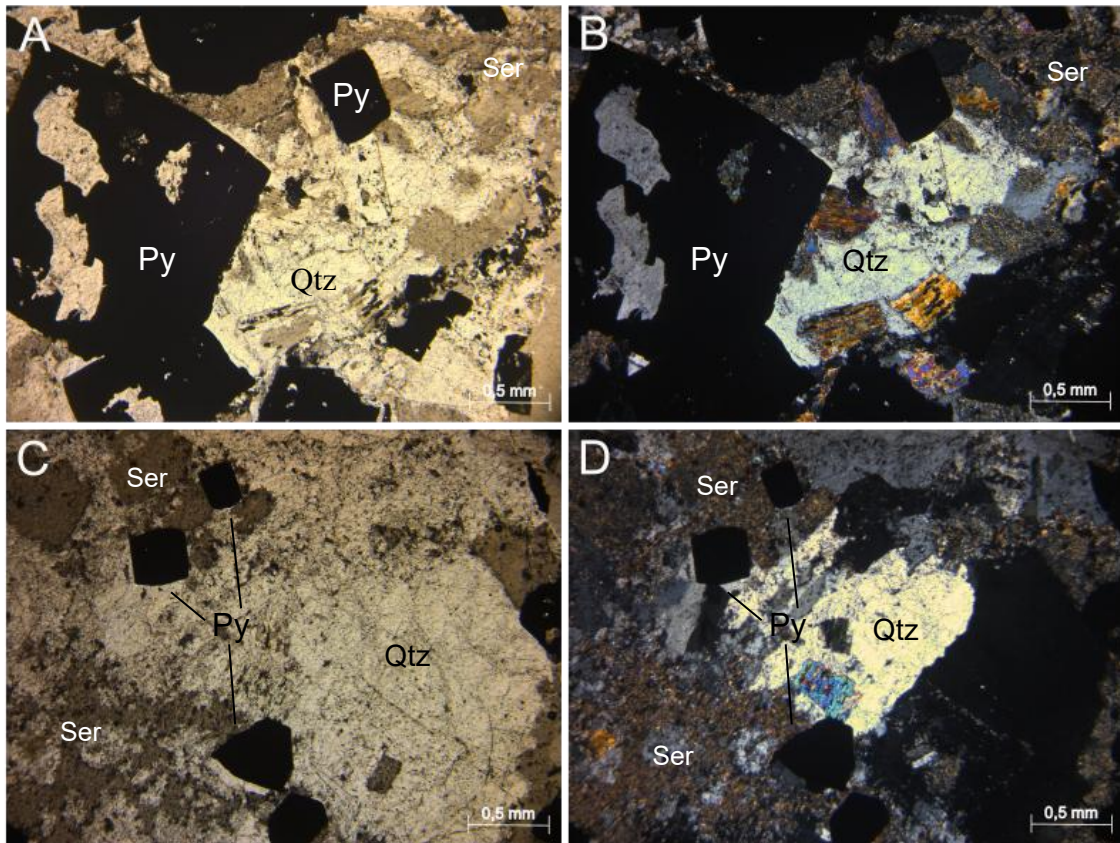


Figura 14- Veio mineralizado com sulfetos e quartzo (A-B), assim como feldspatos em estágio avançado de alteração sericítica (C-D).

Nas rochas mais preservadas do depósito São Chico, as apatitas ocorrem principalmente inclusas em cristais bem preservados de biotita (Figuras 15A e B), mas podem ocorrer também inclusas ou preenchendo espaços entre cristais de quartzo e K-feldspato. Nas porções mais alteradas, a apatita normalmente está inclusa ou associada à pirita e galena (Figuras 15C - D), ou associada a cristais de zircão (Figuras 15E- F).

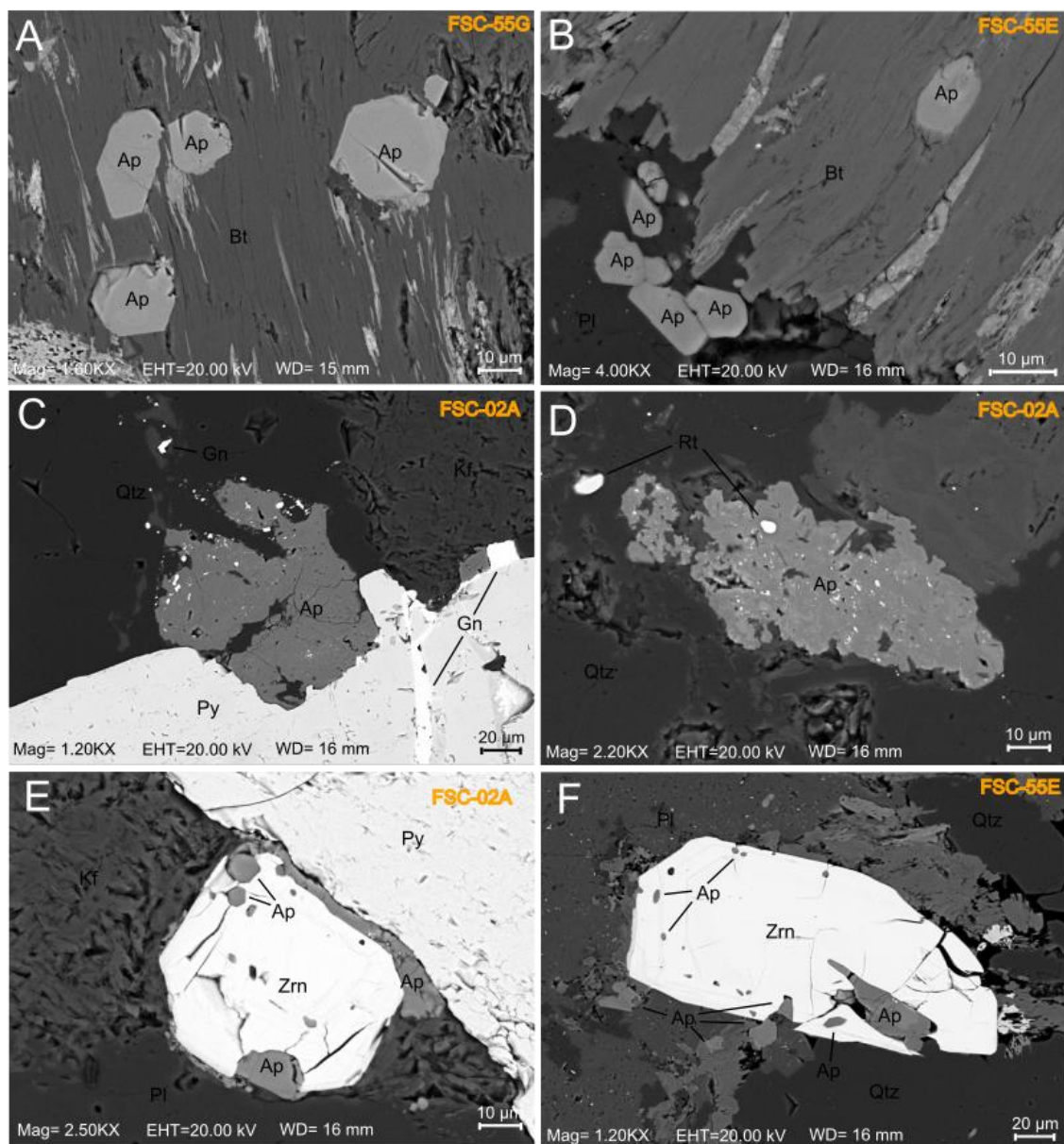


Figura 15- Imagens de elétrons retroespalhados. (A e B): Cristais de apatita (Ap) do depósito São Chico incluídos em biotita (Bt) e plagioclásio (Pl). Nas porções mais alteradas, a apatita normalmente é anédrica, corroída e incluída em quartzo (Qtz) (C e D) ou incluída/associada à pirita (Py), zircão (Zrn) e galena (Gn) (Figuras C a F).

5.2 MORFOLOGIA DOS CRISTAIS DE APATITA

Os cristais de apatita dos depósitos de interesse apresentam morfologia morfológico semelhante. Nas zonas mais preservadas e com menor grau de alteração, apresentam pouca variação morfológica, são cristais euédricos a subédricos, subangulosos (Figuras 16A-B, 17A-B) e, em alguns casos, preservam feições de zoneamento composicional (não mostrado).

Nas zonas mineralizadas e com maior alteração hidrotermal, os cristais de apatita são anédricos e subarredondados, mostram corrosão nas bordas e grau de fraturamento elevado (Figuras 16C-D, 17C-D). Localmente alguns cristais chegam a alterar para monazita e fluorita (não mostrado). As Tabelas 2 e 3 podem evidenciar as diferenças composicionais entre as apatitas das porções mineralizadas e estéreis.

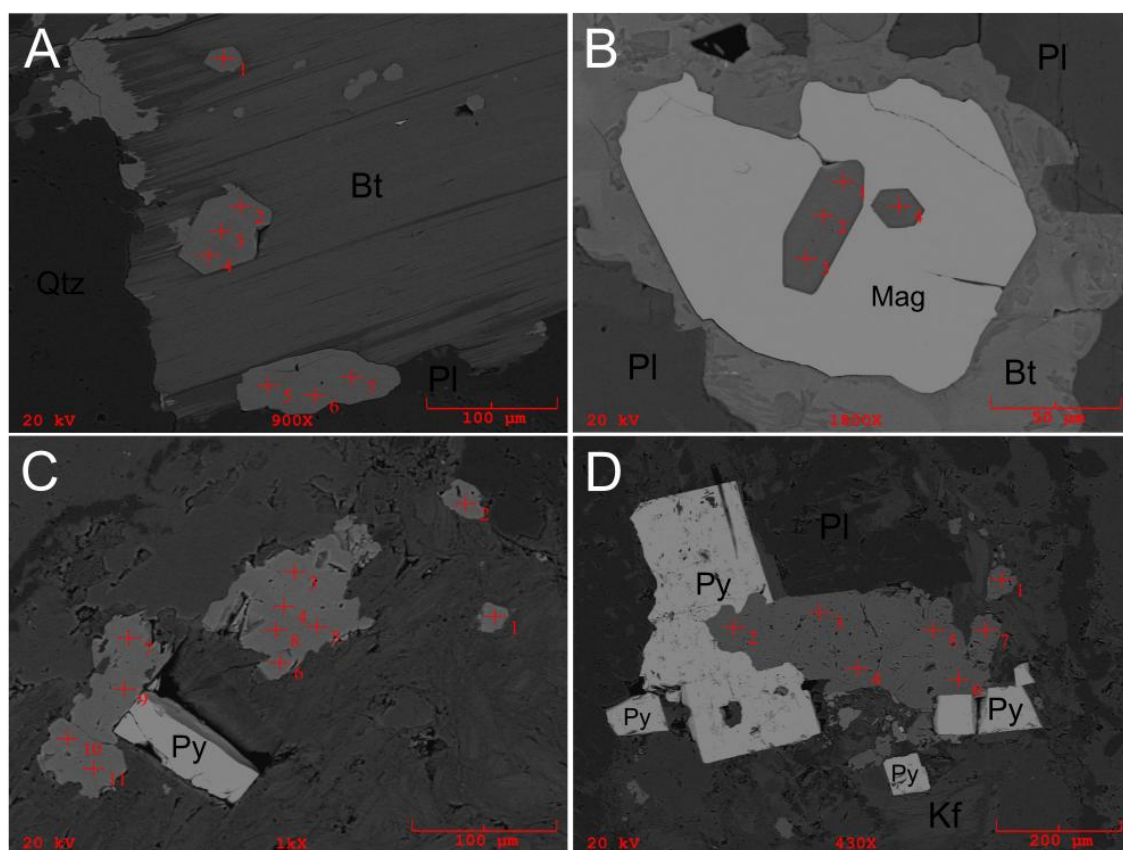


Figura 16- Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) do depósito São Jorge, das apatitas da zona estéril/inalterada (A-B) associadas a minerais primários da rocha (Bt e Mag), assim como das apatitas da zona hidrotermalizada/mineralizada (C-D) associada a sulfetos. Cruz vermelha: análises de MEV-EDS.

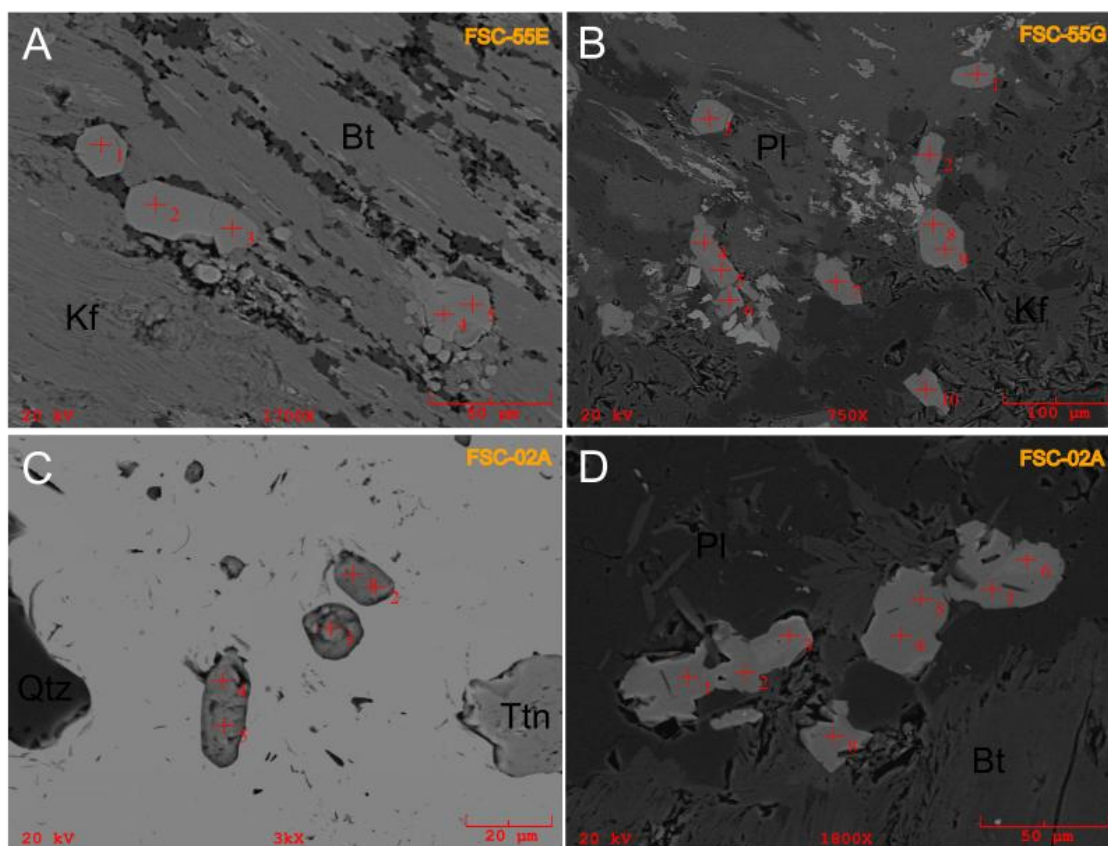


Figura 17- Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) do depósito São Chico, das apatitas da zona hidrotermalmente alterada, mas não mineralizada (A-B), assim como das apatitas da zona mineralizada/em veios (C-D). Cruz vermelha: análises de MEV-EDS.

5.3 QUÍMICA MINERAL DE APATITA POR EDS

As análises de EDS realizadas em cristais de apatita dos depósitos São Jorge e São Chico seguiram uma rotina envolvendo 24 elementos representados por: O, F, Ca, P, Na, Si, Sr, Fe, Cu, Pd, Ag, Hg, Pb, Bi, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho e Yb. Esses elementos foram selecionados devido às suas afinidades com a apatita e com mineralizações auríferas, como citados na literatura (p.ex. Belousova *et al.* 2001, Cao *et al.* 2011, Bouzari *et al.* 2016, Mao *et al.* 2016, Lin *et al.* 2023, entre outros).

5.3.1 Depósito São Jorge (DSJ)

No DSJ, foram analisadas apatitas da zona estéril, porém parcialmente hidrotermalizada (Furo 07), e da zona mineralizada e fortemente hidrotermalizada: (1) com teores de ouro mais elevados (Furo 2: 1,36 a 8,03 g/t); (2) com teores de ouro intermediários (Furo 4: 2,94 a 4,71 g/t) e, (3) com teores de ouro mais baixos (Furo 6: 2,53 a 2,98 g/t). A Figura 18 mostra, mesmo em análises semiquantitativas de EDS, uma

boa separação nas apatitas da zona mineralizada. Na Figura 18A as apatitas da zona mineralizada apresentam menores conteúdos de Ca e P, sugerindo substituição desses por outros elementos. Na Figura 18B, nota-se um aumento nos teores de F e Y em direção às apatitas que ocorrem na zona mais alterada e com os maiores conteúdos de Au, embora com pequena superposição com apatitas da zona estéril. A Figura 18C, que relaciona F+Y *versus* Hg+Pb+Bi, mostra um *trend* de diminuição em F+Y das apatitas da zona mais hidrotermalizada e com os maiores teores de ouro para as apatitas das zonas menos alteradas e mais empobrecidas em ouro (Furos 4 e 6). Por outro lado, Hg+Pb+Bi apresentam comportamento oposto e são menos abundantes nas apatitas da zona com os maiores teores de ouro, sugerindo que esses elementos podem ter se concentrado para formar preferencialmente sulfetos (p.ex. pirita, galena). Outra possibilidade é que tais elementos tenham sido remobilizados das apatitas com os maiores teores de ouro pelos fluidos hidrotermais que percolaram as rochas do depósito e se concentrado para formar os sulfetos. As apatitas da zona estéril e pouco alterada mostram comportamento intermediário no diagrama (Figura 18C).

Tabela 2- Análises químicas pontuais representativas das apatitas do GSJJ apresentadas nas Figuras 18 e 19, sendo esses pontos correspondentes às análises das apatitas apresentadas na Figura 16.

Amostra		O(%)	F(%)	Cl(%)	P(%)	Ca(%)	Y(%)	Hg+Pb+Bi (%)	F/Cl
ESTÉRIL	A.1	16,58	1,89	0,10	23,31	42,42	1,50	3,61	19,69
	A.2	19,55	1,92	0,02	22,19	40,90	1,90	3,23	96,00
	A.3	17,00	1,92	0,09	23,21	42,03	1,68	2,67	21,10
	A.4	16,58	2,05	0,13	23,19	42,18	1,28	3,00	16,27
	A.5	17,31	1,77	0,03	23,32	43,33	1,17	3,37	55,31
	A.6	17,07	1,65	0,07	23,43	42,46	1,35	3,42	22,30
	A.7	16,71	1,87	0,08	23,07	42,61	1,86	2,51	24,29
	B.1	15,03	2,82	0,12	23,58	42,29	1,59	2,90	24,31
	B.2	16,57	1,98	0,04	23,42	42,14	1,87	2,42	49,50
	B.3	16,27	2,31	0,07	22,84	42,76	1,87	2,44	31,22
	B.4	16,02	2,54	0,04	23,21	42,07	1,69	3,42	72,57
	MINERALIZADO	C.1	19,77	1,69	0,10	22,21	39,22	1,54	4,96
C.2		21,06	2,07	0,01	22,45	38,18	1,56	3,62	258,75
C.3		20,87	2,41	0,03	21,74	38,19	1,23	5,09	89,26
C.4		20,91	2,50	0,03	21,74	39,24	1,45	3,32	92,59
C.5		21,35	2,32	0,09	21,23	38,85	1,81	5,04	26,07
C.6		21,93	2,45	0,06	21,76	38,30	1,60	4,02	44,55
C.7		20,92	2,24	0,01	21,21	37,97	1,49	5,80	320,00
C.8		20,63	2,99	0,12	20,87	39,13	1,90	4,46	25,56
C.9		20,19	1,81	0,04	21,89	39,86	1,41	4,04	43,10
C.10		19,51	2,10	0,04	22,28	39,86	1,63	3,39	47,73
C.11		19,59	2,23	0,04	22,38	39,72	1,86	4,13	63,71
D.1		19,98	1,83	0,04	21,78	39,03	1,54	3,66	50,83
D.2		18,64	2,05	0,11	22,36	40,12	1,63	2,79	19,16
D.3		18,81	2,01	0,07	22,44	40,13	1,52	3,89	30,00
D.4		18,88	1,96	0,04	22,15	39,60	1,93	4,30	45,58
D.5		17,81	2,52	0,08	22,35	40,09	1,94	3,47	31,50
D.6		19,17	2,48	0,12	22,07	38,81	1,83	4,29	20,67
D.7		19,57	1,80	0,11	21,48	40,17	1,52	5,34	17,14

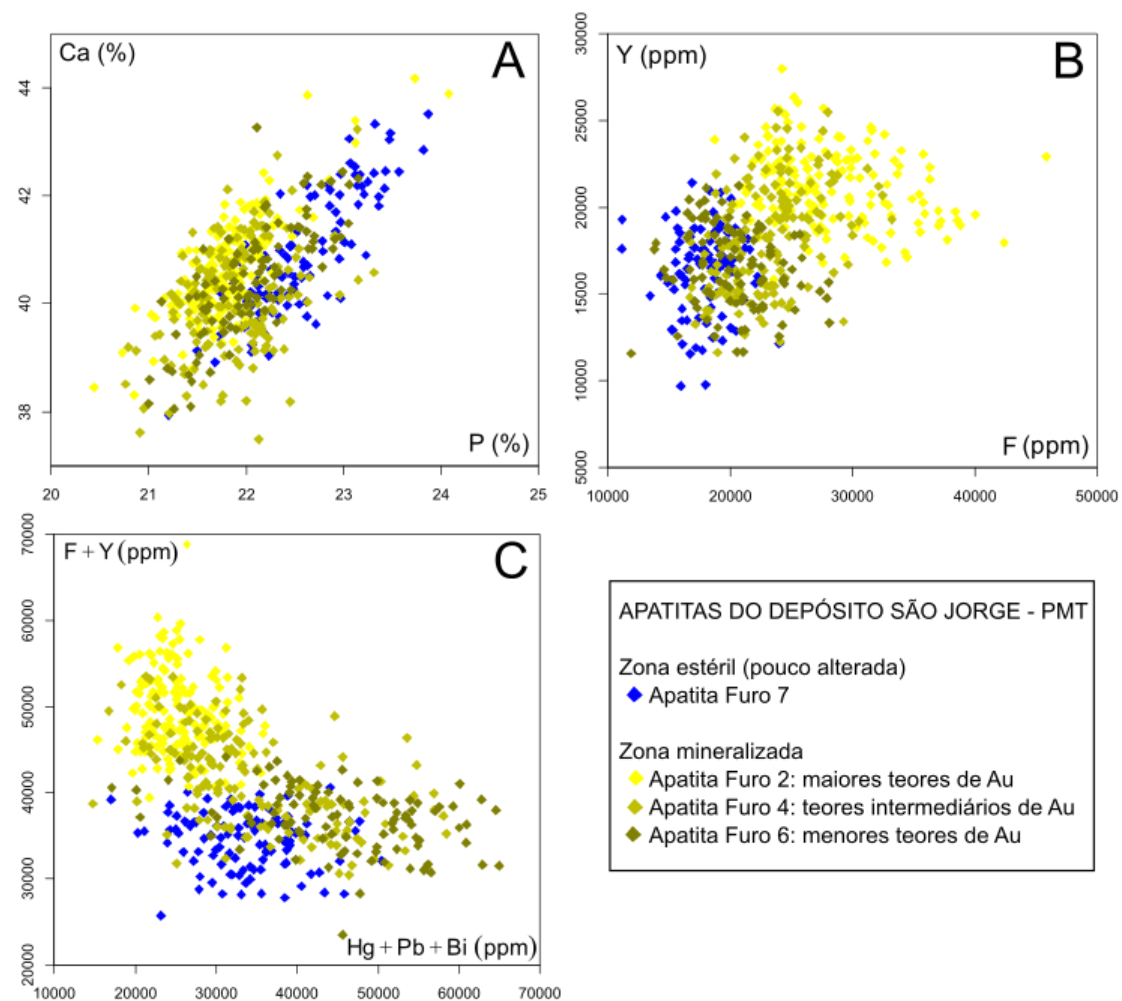


Figura 18- Diagramas representativos das assinaturas geoquímicas obtidas por MEV-EDS presentes nas apatitas do Depósito São Jorge.

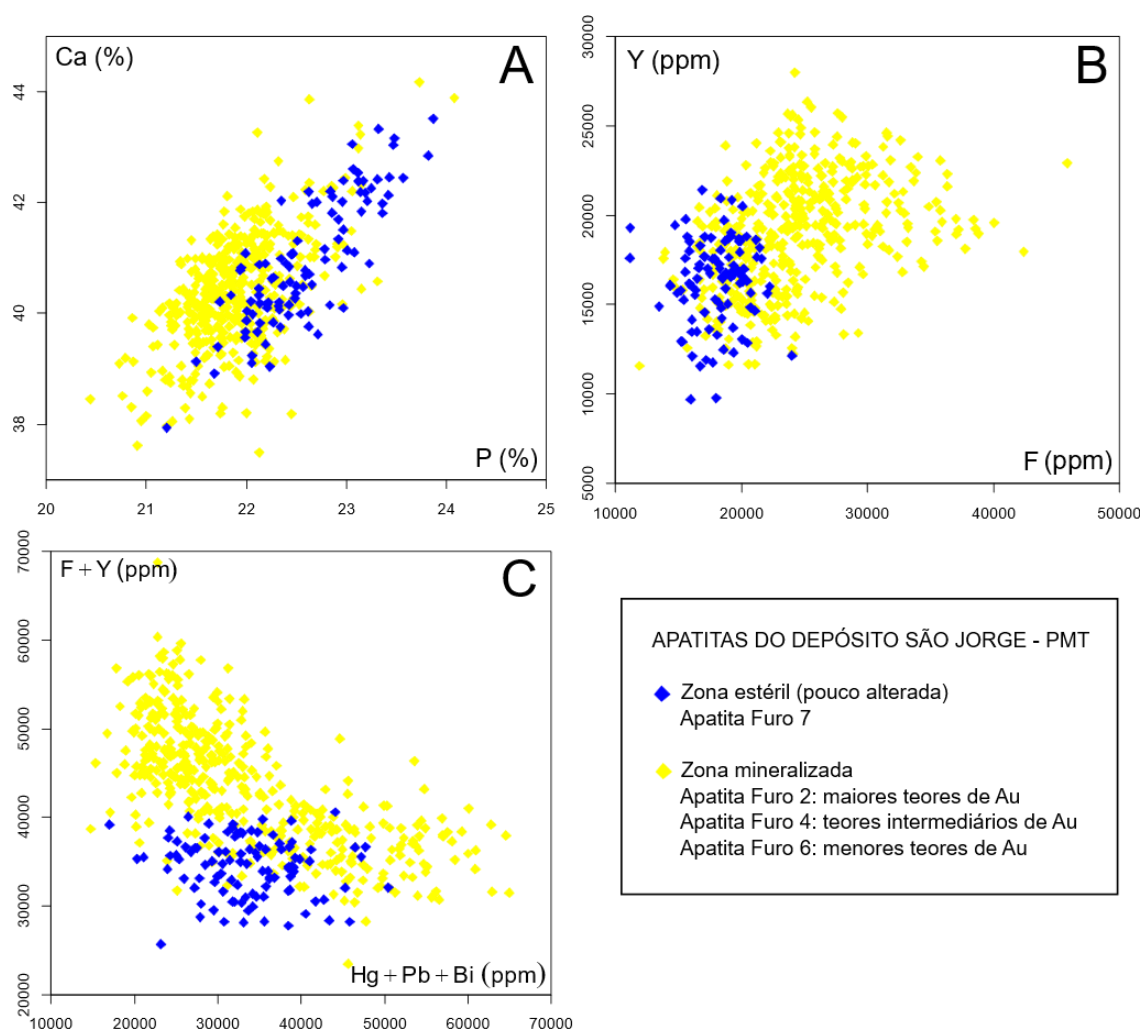


Figura 19- Diagramas representativos das assinaturas geoquímicas obtidas por MEV-EDS presentes nas apatitas do Depósito São Jorge, destacando apenas a zona mineralizada e zona estéril.

5.3.2 Depósito São Chico (DSC)

No DSC, a mineralização ocorre predominantemente em veios de quartzo mineralizados com sulfeto e ouro. Entretanto, nos halos de alteração próximos a esses veios foram identificados cristais de apatita e realizadas análises composicionais por MEV-EDS. Desse modo, considerou-se como zona não mineralizada as rochas presentes nesses halos, porém com alteração potássica e propilítica distal, conforme descritas por Lima *et al.* (2023). As apatitas dos veios de quartzo mineralizados mostram enriquecimento em Ca e P (Figura 20A), assim como em F, Y e Hg+Pb+Bi de forma mais discreta (Figuras 20B e C). As apatitas dos halos de alteração são mais empobrecidas em Ca e P e mostram grande superposição nos conteúdos de Y, F e da somatória Hg+Pb+Bi, muito provavelmente em decorrência das alterações potássica e propilítica impressas em suas rochas hospedeiras.

Tabela 3- Análises químicas pontuais representativas das apatitas do GSJJ apresentadas nas Figuras 20, sendo esses pontos correspondentes às análises das apatitas apresentadas na Figura 17.

Amostra		O(%)	F(%)	Cl(%)	P(%)	Ca(%)	Y(%)	Hg+Pb+Bi(%)	F/Cl
NÃO MINERALIZADO	A.1	21,35	1,36	0,24	21,82	39,14	1,92	4,00	5,64
	A.2	21,20	1,74	0,31	21,73	38,42	1,65	4,55	5,59
	A.3	23,49	1,91	0,20	21,57	37,88	1,76	3,94	9,36
	A.4	20,90	1,68	0,36	21,65	38,79	1,62	4,91	4,65
	A.5	22,40	1,56	0,36	21,26	38,36	1,83	4,21	4,30
	B.1	22,32	2,10	0,19	21,73	38,72	1,34	2,54	10,94
	B.2	22,97	1,96	0,35	21,72	38,44	1,48	2,81	5,55
	B.3	23,57	1,70	0,37	21,12	38,11	1,63	3,04	4,59
	B.4	23,60	1,94	0,35	21,34	38,34	1,49	2,91	5,61
	B.5	23,01	1,89	0,18	21,45	39,56	1,50	2,41	10,68
	B.6	22,06	2,13	0,22	21,71	39,23	1,76	2,62	9,86
	B.7	23,02	2,22	0,05	21,64	38,90	1,39	2,93	42,69
	B.8	22,63	1,99	0,25	21,20	38,01	1,69	3,21	8,12
	B.9	22,59	1,94	0,20	21,50	38,26	1,35	3,20	9,75
	B.10	22,78	2,17	0,12	21,17	39,43	1,59	3,33	17,64
MINERALIZADO	C.1	18,60	2,01	0,08	21,23	38,46	1,55	3,92	26,10
	C.2	18,76	2,08	0,08	22,22	40,72	2,06	2,91	26,00
	C.3	11,56	2,09	0,09	23,51	44,85	1,70	3,03	22,47
	C.4	17,43	2,16	0,19	21,90	40,88	2,40	2,90	11,19
	C.5	19,92	2,94	0,21	21,16	39,32	1,91	2,84	14,20
	D.1	18,14	2,08	0,09	21,85	37,09	0,99	3,66	23,37
	D.2	18,39	2,44	0,17	22,05	40,27	1,84	5,09	14,61
	D.3	17,63	2,50	0,11	22,72	40,30	1,76	2,57	22,32
	D.4	18,92	2,08	0,04	22,68	40,54	1,89	3,18	48,37
	D.5	17,73	2,25	0,04	22,46	41,10	1,87	5,00	54,88
	D.6	19,20	1,70	0,13	22,45	39,57	1,97	3,30	13,60
	D.7	16,93	2,50	0,03	23,45	41,25	1,94	3,11	80,65
	D.8	16,15	3,15	0,04	22,90	41,87	1,66	3,34	71,59

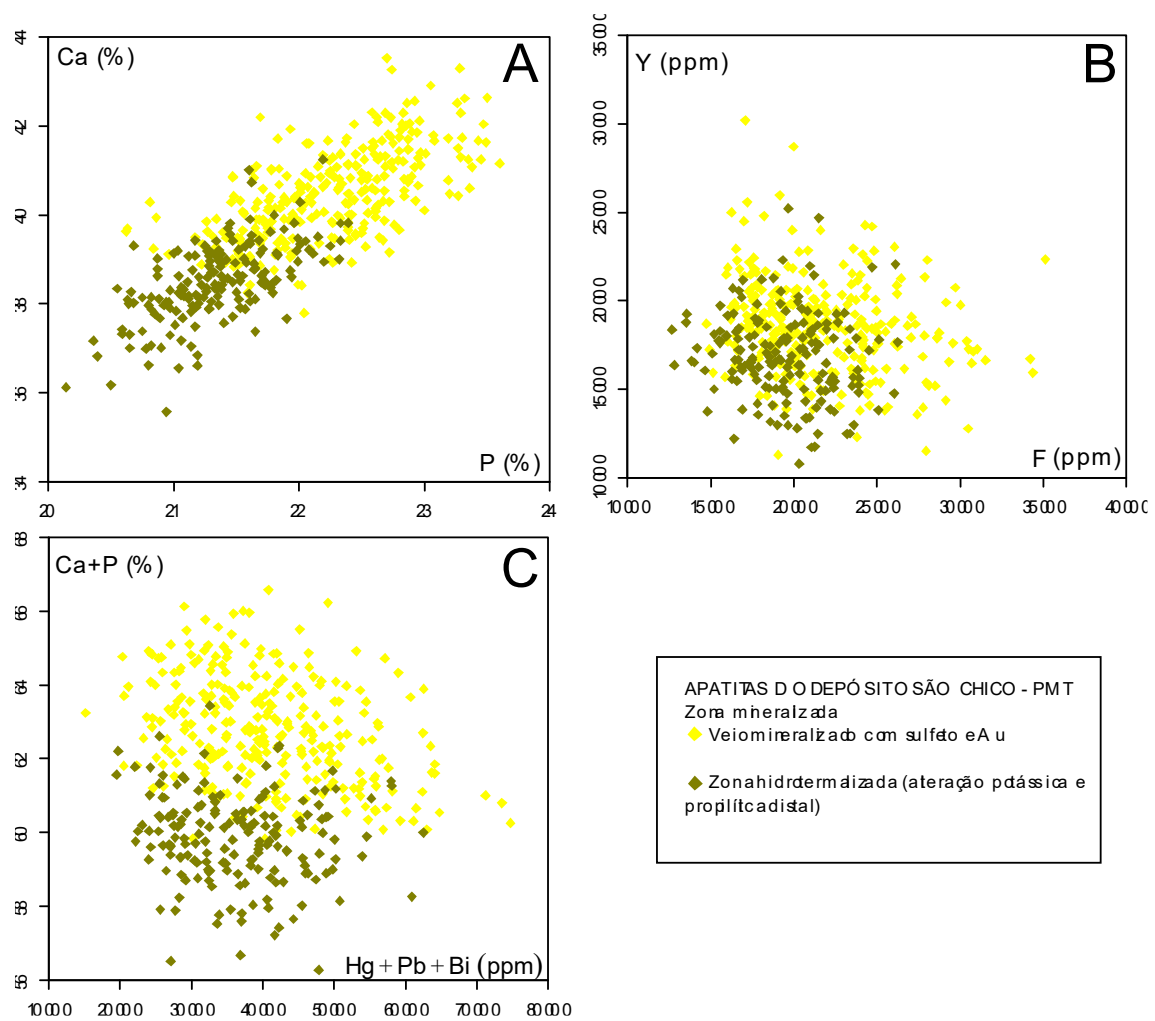


Figura 20- Diagramas representativos das assinaturas geoquímicas, obtidas por MEV-EDS, presentes nas apatitas do Depósito São Chico.

6 DISCUSSÕES

A química mineral de apatitas pode ser utilizada na caracterização petrológica e metalogenética de um depósito mineral, porém outros minerais como zircão, titanita e rutilo já mostraram eficiência neste tipo de estudo e podem ser complementares aos demais, fornecendo uma visão mais abrangente quando analisados em conjunto. Estudos desses minerais para essa finalidade ainda são limitados, principalmente em depósitos do cráton amazônico, mais especificamente na PMT.

A separação das zonas mineralizadas e estéreis, com base nas composições de cristais de apatita em ambos os depósitos estudados, apresentou resultados similares. Em ambos os casos, foi possível identificar cristais subédricos a anédricos, localmente subarredondados, fraturados e corroídos que são dominantes nas rochas mais alteradas, mineralizadas e com maiores teores de ouro. Composicionalmente, tais cristais são mais enriquecidos ou mostram tendência ao enriquecimento em F, Y, Hg+Pb+Bi. Ainda, segundo Liu *et al.* (2020), valores mais elevados da razão F/Cl podem ser indicativos de zonas mineralizadas em relação a zonas estéreis da rocha, o que ficou confirmado nesse estudo (Figura 21).

Tais observações indicam que a morfologia e a geoquímica de cristais de apatita de rochas granitoides mineralizadas com ouro podem funcionar preliminarmente como bons indicadores para esse tipo de mineralização, mesmo em análises semiquantitativas de MEV-EDS.

Análises quantitativas e mais precisas de microsonda eletrônica, programadas para serem realizadas no Laboratório de Microanálises do IG-UFPA e utilizadas em um artigo científico, devem melhorar os dados obtidos, inclusive com a identificação de elementos terras raras, cujos teores ficaram abaixo dos limites de detecção nas análises de EDS, e que são fundamentais em estudos de química mineral. A superposição de apatitas das zonas mineralizadas e estéril, como mostrado nos diagramas geoquímicos, decorrem, muito provavelmente, da alteração hidrotermal heterogênea nos depósitos estudados, dificultando o estudo comparativo de apatitas de áreas tipicamente estéreis e isentas de alteração com aquelas das zonas mineralizadas. Entretanto, esta superposição deve ficar menos evidente com as análises de microsonda, além de outros elementos traço que poderão ser identificados e quantificados, como Cu, Ag, Te, As, V e contribuir para melhorar as discussões e interpretações apresentadas.

Além disso, apesar dos resultados geoquímicos apontarem algumas semelhanças entre os dois depósitos, as diferenças na resposta podem evidenciar a diferença entre os

modelos genéticos ou o estilo da mineralização dos depósitos, que pode ter influência direta na composição química dos grãos de apatita.

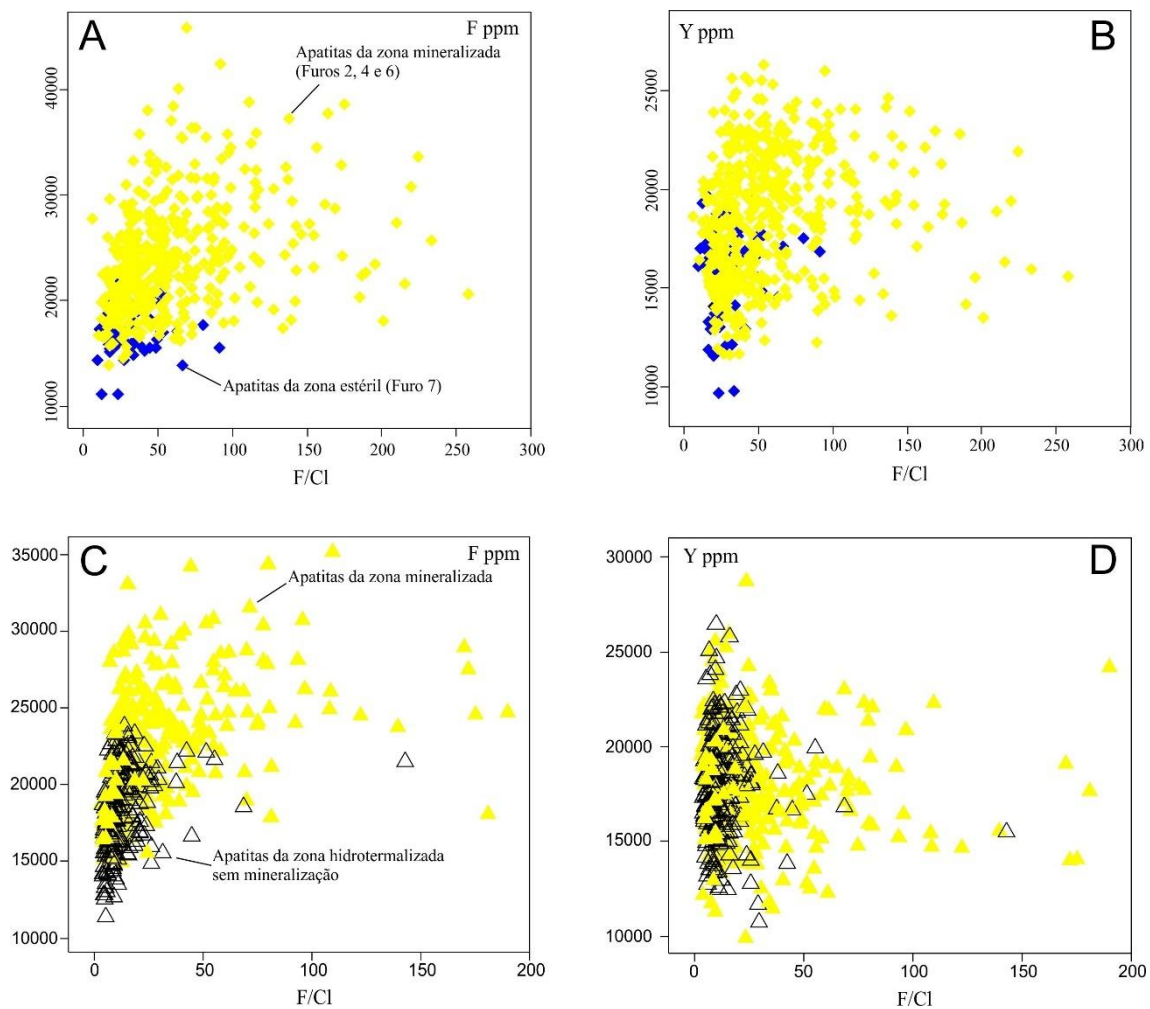


Figura 21- Diagramas com razões F/Cl x F e F/Cl x Y das apatitas dos depósitos São Jorge e São Chico, PMT.

7 CONCLUSÕES

A química mineral em minerais acessórios de rochas granitoides é uma ferramenta muito eficaz para estudos petrológicos e metalogenéticos. Neste último caso, ainda é pouco utilizada no Brasil, mais especificamente em regiões de ocorrência de depósitos ou importantes províncias minerais. Zircão, apatita, titanita, rutilo, magnetita e ilmenita são acessórios que podem fornecer informações complementares importantes em estudos voltados para a exploração mineral. Uma análise preliminar utilizando MEV-EDS desses minerais pode gerar bons resultados sobre a ocorrência de minérios como Au, Ag, Cu, Sn, W, Mo, Pt, Ta, dentre outros, em uma determinada região, província e depósito mineral, ou ainda, orientar o início de etapas de sondagens muito mais onerosa.

No caso dos depósitos de ouro São Jorge e São Chico na PMT, a química mineral de cristais de apatita presentes nas zonas mais preservadas e pouco alteradas, juntamente com cristais das zonas fortemente hidrotermalizadas contendo sulfetos e ouro, forneceu resultados positivos e animadores, mesmo com análises semiquantitativos de MEV-EDS. Nas zonas ditas estéreis e com menor alteração hidrotermal, os cristais de apatita são bem desenvolvidos, euédricos a subédricos e comumente inclusos em cristais de anfibólio, biotita, quartzo e plagioclásio. Nas zonas fortemente hidrotermalizadas contendo sulfetos e ouro, os cristais de apatita são formas anédricos a subarredondados e apresentam fraturas e bordas corroídas.

Em termos composicionais, notou-se nos cristais de apatita da zona mineralizada um enriquecimento, ou uma tendência clara de enriquecimento, em alguns elementos traço como F, Y, Hg, Pb e Bi, e na razão F/Cl em comparação com apatitas das zonas ditas estéreis e menos alteradas. As observações morfológicas e composicionais identificadas em cristais de apatita desses dois depósitos deixam claro que esse mineral acessório pode funcionar como um bom “Mineral Resistato Indicador” para esse tipo de mineralização. Análises de microsonda eletrônica nesses cristais devem fornecer resultados mais precisos e confiáveis, permitindo discussões mais conclusivas quanto à abordagem realizada por MEV-EDS.

REFERÊNCIAS

- Agangi A., Reddy S.M., Plavsa D., Fougere D., Clark C., Roberts M., Johnson T.E. 2019. Antimony in rutile as a pathfinder for orogenic gold deposits: *Ore Geology Reviews*, **106**: 1–11.
- Almeida M.E., Ferreira A.L., Brito M.F.L., Monteiro M.A.S. 2001. Evolução Tectono-estrutural da Província Tapajós com base na geologia das folhas Vila Mamãe Anã e Jacareacanga (1:250.000), região limite dos estados do Amazonas e Pará. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, v.2, p. 58-112.
- Azadbakht Z., Lentz D. R., McFarlane C.R.M. 2018. Apatite Chemical Compositions from Acadian-Related Granitoids of New Brunswick, Canada, Implications for Petrogenesis and Metallogenesis. *Minerals*, 2018, 8, 598; doi:10.3390/min8120598.
- Belousova E.A., Walters S., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. 2001. Trace-element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland. *Australian Journal of Earth Sciences* **48**, 603–619.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. 2002. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type. *Journal of Geochemical Exploration*, **76**: 45-69.
- Borges R.M.K., Dall'Agnol R., Lamarão C.N., Figueiredo M.A.B.M., Leite A.A.S., Barros C.E.M., Costi H.T. 2009. Petrografia, química mineral e processos hidrotermais associados ao depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **39**(2): 375-393, Jun.
- Bouzari F., Hart C.J.R., Bissig T., Barker S. 2016. Hydrothermal Alteration Revealed by Apatite Luminescence and Chemistry: A Potential Indicator Mineral for Exploring Covered Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, 111: 1397–1410.
- Breiter K., Lamarão C.N., Borges R.M.K., Dall'Agnol R. 2014. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites. *Lithos*, 192-195, p 208-225.
- Bruand E., Fowler M., Storey C., Darling J. 2017. Apatite trace element and isotope applications to petrogenesis and provenance. *American Mineralogist*, 102: 75–84.
- Cao M., Li G., Qin K., Seitmuratova E.Y., Liu Y. 2011. Major and Trace Element Characteristics of Apatites in Granitoids from Central Kazakhstan: Implications for Petrogenesis and Mineralization. *Resource Geology*, 62, (1): 63–83, doi: 10.1111/j.1751-3928.2011.00180.x.
- Cassini L.V., Moya J.F., Cellier G., Freitas B., Juliani C., Laurent O. 2022. Towards the fertility trend. *Ore Geology Reviews*, 142 e104643. doi:10.1016/j.oregeorev.2021.104643.

Castro A.A. 2015. *Gênese do depósito de ouro Tocantinzinho, Província Aurífera Tapajós (PA): evidências a partir de dados de geologia, petrologia e inclusões fluidas*. MS Dissertation, Pós-Graduação em Geologia/ Universidade de Brasília. Brasília-DF.

Che X.D., Linnen R.L., Wang R.C., Groat L.A., Bruand A. 2013. Distribution of trace and rare earth elements in titanite from tungsten and molybdenum deposits in Yukon and British Columbia, Canada. *Canadian Mineralogist*, 51:415–438. doi.org/10.3749/canmin.51.3.415.

Chew D.M. & Spikings R.A. 2015. Geochronology and thermochronology using apatite: time and temperature, lower crust to surface. *Elements*, 11(3): 189-194. doi: <https://doi.org/10.2113/gselements.11.3.189>.

Chew D.M. & Spikings R.A. 2021. Apatite U-Pb Thermochronology: A Review. *Minerals*, 11(1095), 1-21. doi: <https://doi.org/10.3390/min11101095>.

Chu M.F., Wang K.L., Griffin W.L., Chung S.L., O'Reilly S.Y. Pearson N.J. 2009. Apatite Composition: Tracing Petrogenetic Processes in Transhimalayan Granitoids. *Journal of Petrology*, v. 50, n. 10, p. 1829-1855. doi:10.1093/petrology/egp054.

Corrêa G.R. 2022. Química mineral de apatitas de granitos da Província Carajás: morfologia, composição e considerações petrológicas e metalogenéticas. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Belém-PA, 57 p.

Coutinho M.G.N. 2008. Evolução tectono-geológica e modelo de mineralização de ouro. In: Coutinho, M.G.N. (org.). *Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa provisional para ouro em SIG*. Rio de Janeiro, CPRM, 1: 299-319.

Dall'Agnol R., Lamarão C.N., Figueiredo M.A.B.M., Borges R.M.K., Leite A.A.S., Barros C.E.M., Costi H.T. 2003. Processos hidrotermais associados a mineralizações auríferas: o exemplo do depósito São Jorge, Província Tapajós. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 8., Manaus. *Anais...Manaus*, SBG.

Farias E.M.B. 2025. Apatita como ferramenta petrogenética: potencialidades e limitações. *Terrae Didactica*, Campinas, SP, v. 21, n. 00. DOI: 10.20396/td.v21i00.8678559. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8678559>. Acesso em: 15 dez. 2025.

Fernandes C.M.D., Teixeira N.P.T., Borges R.M.K., Bittencourt J.S. 2006. Química mineral da muscovita de rochas graníticas e greisens da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 36 (I - Suplemento): 26-33.

Ferreira A.L., Almeida M.E., Brito M.F.L., Monteiro M.A.S. (org.). 2000. Geologia e recursos minerais da Folha Jacareacanga – SB.21-Y-B: estados do Amazonas e Pará. Brasília, DF, CPRM. Escala 1:250.000.

Ferreira A.L.L., Rizzotto G.J., Quadros M.L. do E.S., Bahia R.B.C., Oliveira M.A. 2004. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Sistema de Informações Geográficas: folha SB.21 -Tapajós. Brasília, CPRM. 1 mapa. Escala 1.000.000.

Fonseca C.S. 2016. Apatita como indicador de granitos estaníferos do sudoeste do Pará. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 83 p.

Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 40: 261-293.

Gaia S.M.S. & Souza Filho C.R. 2023. Predictive Mapping of Prospectively for Gold in the Central Portion of the Tapajós Mineral Province, Brazil. *Minerals*, 13. <https://doi.org/10.3390/min13111432>.

Hasui Y., Haralyi N.L.E., Schobbenhaus C. 1984. Elementos geofísicos e geológicos da região amazônica: subsídios para o modelo geotectônico. In: Simpósio Amazônico, 2. *Anais...* Manaus, DNPM, p. 129-147.

Hong J., Zhang H., Yuan Y., Wang J., Wang F., Liu J., Zhao Q. 2021. Textures and trace element geochemistry of magnetite in the Beiya gold deposit, SW China. *Geological Journal*, p. 1-14. DOI: 10.1002/gj.4187.

Hoskin P.W.O., Kinny P.D., Wyborn D., Chappell B.W. Identifying Accessory Mineral Saturation during differentiation in granitoid magmas: an Integrated Approach. *Journal of Petrology*, 41 (9): 1365-1396, 2000.

Hoskin P.W.O. & Ireland T. R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7): 627–630.

Janousek, V., Farrow, C.M., Erban, V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology* 47:1,255-1,259.

Juliani C., Assis R.R., Monteiro L.V.S., Fernandes C.M.D., Martins J.E.Z.S., Costa J.R.C. 2021. Gold in Paleoproterozoic (2.1 to 1.77 Ga) Continental Magmatic Arcs at the Tapajós and Juruena Mineral Provinces (Amazonian Craton, Brazil): A New Frontier for the Exploration of Epithermal–Porphyry and Related Deposits. *Minerals*, 11, 714. <https://doi.org/10.3390/min11070714>.

Juliani C. & Fernandes C.M.D. 2010. "Well-preserved Late Paleoproterozoic Volcanic Centers in the São Félix Do Xingu Region, Amazonian Craton, Brazil." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 191.3..

Juliani C., Rye R.O., Nunes C.M.D., Snee L. W., Silva R.H.C., Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S. Neumann R., Alcover Neto A. 2005. Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable isotope constraints. *Chemical Geology*, 215:95-125.

Juliani C., Vasquez M.L., Klein E.L., Villas R.N.N., Echeverri Misas C.M., Santiago É.S.B., Monteiro L.V.S., Carneiro C. de C., Fernandes C.M.D., Usero G. (ed.). 2014. Metalogênese da Província Tapajós. In: Silva M da G. da *et al.* Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras. Belo Horizonte, CPRM. p. 229-268. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/aaff81d9-efc5-414d-a7f4-211d187f4c84/2675988.pdf>.

Juras S., Gregersen S., Alexander R. 2011. *Technical report for the Tocantinzinho Gold Project*, Brazil. Vancouver: Eldorado Gold Corporation. Disponível em: <https://s2.q4cdn.com/536453762/files/docdownloads/Reports/TocantinzinhoTechnicalReport-May2011.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2024.

Kendall-Langley L. 2020. *Assessing the petrogenetic importance of apatite inclusions in zircon for constraining volatile behavior in arc magmas*. Dissertation, School of Earth Sciences, University of Western Australia.

Klein C. & Dutrow B. 2012. *Manual de ciência dos minerais*. 23 ed. Porto Alegre, Bookman, 716 p.

Klein E.L., Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Carvalho J.M. de A. 2002. Geology of Paleoproterozoic gneiss and granitoid-hosted gold mineralization in southern Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil. *International Geology Review*, **44**: 544-558.

Lafon J.M. & Coutinho M.G.N. 2008. Isótopos radiogênicos de chumbo. In: Coutinho M. G. N. (org.). *Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa provisional para ouro em SIG*. Rio de Janeiro, CPRM, **1**: 299-326.

Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Lafon J.M., Lima E. 2002. Geology, geochemistry, and Pb-Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic magmatism of Vila Riozinho, Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, **119**: 189-223.

Lamarão C.N. & Dall'Agnol R. 2004. Química mineral de anfibólios e biotitas e condições de cristalização de granitoides paleoproterozoicos da região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**:95-108.

Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Pimentel M.M. 2005. Nd isotopic composition of Paleoproterozoic volcanic rocks of Vila Riozinho: implications for the crustal evolution of the Tapajós gold province, Amazon craton. *Journal of South American Earth Sciences*, **18**:277-292.

Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Soledade G.L., Silva J.S. 2007. Variações composicionais de zircão em granitos anorogênicos Proterozoicos do Cráton Amazônico: implicações metalogenéticas. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(4):693-704.

Lamarão C.N., Marques G.T., Oliveira D.C., Costi H.T., Borges R.M.K., Dall'Agnol R. 2018. Morphology and composition of zircons in rare metal granites from Brazilian tin provinces. *J. S. Am. Earth Sci.* **84**:1–15.

- Leite P.A.F. 2020. *Trace element geochemistry of apatite and magnetite in gold systems of the Alta Floresta Mineral Province: petrogenetic and metallogenic implications*. Dissertation. Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente (Recursos Naturais). Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Rio Claro- SP. 187 p.
- Li H., Li J.W., Algeo T.J., Wu J.H., Cisse M. 2018. *Zircon indicators of fluid sources and ore genesis in a multi-stage hydrothermal system: The Dongping Au deposit in North China*. *Lithos* 314-315, p. 463-478. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.025>.
- Lima R.C., Vasquez M.L., Paiva I.S. 2023. Aspectos metalogenéticos do depósito aurífero, Província Mineral Tapajós, Pará: informações com base em petrografia, MEV e inclusões fluidas dos veios Principal e Júlia. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 17, 2023. *Anais...* Santarém: SBG.
- Lin S., Hu K., Cao J., Liu Y., Liu S., Zhang B. 2023. Geochemistry and origin of hydrothermal apatite in Carlin-type Au deposits, southwestern China (Gaolong deposit). *Ore Geology Reviews*, 154, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105312>.
- Liu Y., Jiang S.H., Bagas L., Chen C.L., Han N., Wan Y.Y. 2020. Petrogenesis and metallogenic potential of the Wulanba granite, southern Great Xing’na Range, NE China: constraints from whole-rock and apatite geochemistry. *Geological Magazine*, **157**: 411–434. <https://doi.org/10.1017/S0016756819000876>.
- Lopes A.A.C. & Moura M.A. 2019. The Tocantinzinho Paleoproterozoic Porphyry-Style Gold Deposit, Tapajós Mineral Province (Brazil): Geology, Petrology and Fluid Inclusion Evidence for Ore-Forming Processes. *Minerals*, 9, 29; doi:10.3390/min9010029.
- Lu Y.J., Loucks R.R., Fiorentini M., McCuig T.C., Evans N.J., Yang Z.M., Hou Z.Q., Kirkland C.L., Parra-Avila L.A., Kobussen A. 2016. Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu $\pm$ Mo $\pm$ Au Deposits. *Society of Economic Geologists*, Inc. Special Publication **19**:329–347
- Mao M., Rukhlov A.S., Rowins S.M., Spence J., Coogan L.A. 2016. Apatite trace element compositions: a robust new tool for mineral exploration. *Economic Geology*, **111**: 1187-1222.
- Medeiros M.F.C. 2025. *Composição de rutilo como guia prospectivo para depósitos hidrotermais de Au: O exemplo do depósito São Jorge Jovem, Província Mineral do Tapajós, Cráton Amazônico*. Dissertação de Mestrado, Programa da Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, UFP, 53 p.
- Misas C.M.E. 2010. *Evolução magmática, alteração hidrotermal e gênese da mineralização de ouro e cobre do Palito, Província Aurífera do Tapajós (PA)*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia/Universidade de São Paulo.
- Nery P.H.S. 2017. *Composição química de apatita de granitos paleoproterozoicos da Província Carajás: implicações petrológicas e metalogenéticas*. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 70p.

- Plavsa D., Reddy S.M., Agangi A., Clark C., Kylander-Clark A., Tiddy C.J. 2018. Microstructural, trace element and geochronological characterization of TiO₂ polymorphs and implications for mineral exploration. *Chemical Geology*, **476**: 130–149.
- Pereira D.F. 2017. *Petrografia, geoquímica e química mineral das rochas encaixantes do Depósito, Domínio Tapajós, SW do Pará*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica/Universidade Federal do Pará. Belém.
- Reed S.J.B. 1996. Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology. *Cambridge University Press*. 201p.
- Santiago E.S.B. 2012. *Rochas hospedeiras, alteração hidrotermal e avaliação do balanço geoquímico de massa do depósito aurífero Tocantinzinho, Província do Tapajós-PA*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará. Belém-PA, 2012.
- Santiago E.S.B., Villas R.N., Ocampo R.C. 2013. The Tocantinzinho gold deposit, Tapajós province, state of Pará: host granite, hydrothermal alteration and mineral chemistry. *Brazilian Journal of Geology*, **43**(1): 185-208.
- Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., McNaughton N.J., Flecher I.R. 2000. New understanding of the Amazon Craton provinces based on field work and radiogenic isotope data. *Gondwana Res.*, **3**: 453-488.
- Santos J.O.S., Groves D.I., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Moura M.B. 2001. Gold deposits of the Tapajós Province, Amazon Craton. *Mineralium Deposita*, **36**(3):278-299.
- Santos J.O.S. 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: L.A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R.M. Vidotti, J.H. Gonçalves (Eds). *Geologia tectônica e recursos minerais do Brasil: texto mapas & SIG* (169-226), Brasília.
- Santos J.O.S., Van Breemen O.T., Groves D.I., Hartmann L.A., Almeida M.E., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2004. Timing and evolution of multiple Paleoproterozoic magmatic arcs in the Tapajós Domain, Amazon Craton: constraints from SHRIMP and TIMS zircon, baddeleyite and titanite U-Pb geochronology. *Precambrian Research*, v. 13, p. 73-109.
- Sha L-K. & Chappell B.W. 1999. Apatite chemical composition, determined for electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis. *Geochemical Cosmochimica Acta*, (63): 3861-3881.
- Silva R.H.C. 2002. *Caracterização de um sistema epitermal low-sulfidation (adularia-sericita) mineralizado em Au-Cu-Mo em vulcânicas paleoproterozoicas na Província Aurífera do Tapajós: implicações metalogenéticas e tectônicas*. Dissertation. Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 196 p.
- Sotero A.M., Lamarão C.N., Marques G.T., Rodrigues P.R.S. 2015. *Quartzo magmático e hidrotermal do depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Pará: petrografia, microscopia eletrônica de varredura-catodoluminescência e implicações metalogenéticas*. *Brazilian Journal of Geology*, **45**(4): 591-60.

Stabile Jr. A. 2012. Tipo e distribuição da alteração hidrotermal no depósito aurífero Pé Quente, setor leste da Província Aurífera de Alta Floresta (MT). Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas/SP, 59 p.

Tassinari C.C.G., Macambira M.J.B. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**:174-182.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 2004. Evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds.). Geologia do continente Sul-Americano. Evolução da obra de Almeida F.F.M. São Paulo, BECA, p. 471-486.

Triebold S., Luvizotto G.L., Tolosana-delgado R., Zack T., Von Eynatten, H. 2011. Discrimination of TiO₂ polymorphs in sedimentary and metamorphic rocks. *Contrib. Miner. Petrol.* **161**: 581–596.

Vasquez M.L., Klein E.L., Quandros M.L. do E.S., Bahia R.B.C., Santos A.; Ricci P. dos S.F., Sachett C.R., Silva C.M.G., Macambira M.J.B. 1999. Magmatismo Uatumã na Província Tapajós - Novos dados geocronológicos. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Manaus. *Resumos Expandidos...* Manaus, SBG-Núcleo Norte, 1999. p. 471-474.

Vasquez M.L. & Klein E.L. (org.). 2000. *Geologia e recursos minerais da folha Rio Novo*: folha SB.21-Z-C, estado do Pará. Brasília, DF, CPRM, 2000. Escala 1:250.000.

Vasquez M.L., Klein E.L., Ricci P.S.F. 2002. Granitoides pós-colisionais da porção leste da Província Tapajós. In: E.L. Klein, M.L. Vasquez, L.T. Rosa-Costa L.T.(eds.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*, Belém, v. 3, p. 67-84.

Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Silva C.G., Ricci P.F., Barbosa J.O., Klein E.L., Lopes E.S., Macambira E.B., Chaves C.L., Carvalho J.M., Oliveira J.G., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. Litoestratigráficas. In: Vasquez M. L. & Rosa-Costa L. T. da (org.). *Geologia e recursos minerais do estado do Pará*: Sistema de Informações Geográficas – SIG, escala 1:1.000.000. *Texto explicativo*. Belém, CPRM. Unidade 3, p. 113-215.

Vasquez M.L., Chaves C.L., Melo E.M., Oliveira J.K.M. 2017a. Geologia e recursos minerais das folhas São Domingos, SB.21-Z-A-II e Jardim do Ouro, SB.21-Z-A-III. Belém, Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará, CPRM. 305p.

Vasquez M.L., Oliveira J.K.M., Simas M.W., Lafon J.M. 2017b. Fonte e idade da mineralização do depósito de ouro da Província Mineral do Tapajós. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 15. *Anais...* Belém, SBG.

Vasquez M.L., Gaia S.M.S., Chaves C.L., Silva C.M.G. 2024. *Área de relevante interesse mineral (ARIM)*: evolução crustal e metalogenia da Província Mineral do Tapajós. Belém, Serviço Geológico do Brasil, Informe de Recursos Minerais (Série Províncias Minerais do Brasil, n. 39), 334 p.

Villas R.N.N., Santiago E.S.B., Castilho M.P. 2013. Contexto geológico, estudos isotópicos (C, O e Pb) e associação metálica do depósito aurífero Tocantinzinho, domínio Tapajós, Província Tapajós-Parima. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, **13**(1): 111-138.

Xu J., Xia X.-P., Wang Q., Spencer C. J., Zhang L., Zhu X. 2024. Apatite textures, elemental and isotopic compositions unmask the homogenizing process in silicic magma chambers. *Geophysical Research Letters*, 51, <https://doi.org/10.1029/2023GL106646>.