



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 665**

**MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO DE RUTILO COMO GUIA  
PROSPECTIVO PARA DEPÓSITOS DE AU: O EXEMPLO DO  
DEPÓSITO SÃO JORGE, PROVÍNCIA MINERAL DO  
TAPAJÓS**

**Dissertação apresentada por:**

**MARCOS FLÁVIO COSTA MEDEIROS**

**Orientador: Pr. 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)**

---

M488m Medeiros, Marcos Flávio Costa.  
Morfologia e composição de rutilo como guia prospectivo para depósitos de Au: o exemplo do depósito São Jorge, Província Mineral do Tapajós. / Marcos Flávio Costa Medeiros. — 2025.  
xiv, 53 f. : il. color.

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

1. Geoquímica de rutilo. 2. Depósitos de Au. 3. Província Mineral do Tapajós. I. Título.

CDD 551.908115

---



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

**MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO DE RUTILO COMO GUIA  
PROSPECTIVO PARA DEPÓSITOS DE AU: O EXEMPLO DO  
DEPÓSITO SÃO JORGE, PROVÍNCIA MINERAL DO  
TAPAJÓS**

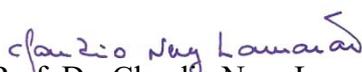
**Dissertação apresentada por:**

**MARCOS FLÁVIO COSTA MEDEIROS**

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

Data de Aprovação: 18 / 03 / 025

Banca Examinadora:

  
Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão  
Orientador – UFPA

  
Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro  
Membro – UFPR

  
Prof. Dr. Carlos Marcello Dias Fernandes  
Membro – UFPA

*A todos que ajudaram na finalização deste trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

- À Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Instituto de Geociências, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, por todo suporte disponibilizado para a elaboração da dissertação;
- Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudo;
- À minha família, em especial a minha mãe, por sempre estar ao meu lado e na torcida durante todo este ciclo;
- Ao Prof. Dr. Claudio Nery Lamarão pela orientação, paciência, carinho, confiança e principalmente, pelos conhecimentos transmitidos;
- Ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG), do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, pelo suporte técnico-científico;
- Ao Laboratório de Microanálises, pelos trabalhos realizados em MEV e microsonda eletrônica. Agradeço a Ana Paula Correa e Gisele Marques pelo suporte fundamental durante as sessões em MEV e microsonda eletrônica, além de ótimas conversas, bons conselhos e justos puxões de orelha...;
- Ao Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro da UFPR, pelos ensinamentos sobre o imageamento por EBSD, bem como ter proporcionado que as amostras deste trabalho fossem analisadas por tal ferramenta;
- Ao LACTEC de Curitiba, Paraná, por ter realizado as análises em EBSD;
- Ao Laboratório de Difração de Raios-X (DRX) do IG-UFPA, em especial ao Geólogo Msc. Aldemir de Melo Sotero pela realização das análises;
- À Joelma Lobo, técnica do laboratório de laminação-UFPA, pelo sempre ágil e brilhante suporte dado as lâminas utilizadas nesta pesquisa;
- Aos amigos que a Geologia me proporcionou, em especial Ismayla Carneiro, Igor Fransua, Isabele Souza e Alan Queiroz;
- Aos amigos do peito, em especial Nelson Bria, Jonatha Brito, Alexandre Monteiro, Luciana Almeida, Brenda Costa e Maíza Borges;
- Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”  
Simone de Beauvoir

## RESUMO

A Província Mineral do Tapajós (PMT), inserida no contexto da província geocronológica Tapajós-Parima ou Ventuari-Tapajós, é reconhecida como a maior província aurífera do Brasil. O Granito São Jorge Jovem (GSJJ), situado a leste da PMT em uma área fortemente fraturada e hidrotermalizada, é o hospedeiro da mineralização aurífera. O GSJJ exhibe filiação cálcio-alcalina rica em K, composto por rochas de composição monzograníticas e leucomonzograníticas, com anfibólio e biotita como principais minerais máficos. Datação Pb-Pb em zircão em leucomonzogranitos revelou uma idade de cristalização de  $1891 \pm 3$  Ma. Os polimorfos de  $TiO_2$  são fases acessórias comuns em diversos tipos de rochas. Na natureza ocorrem como três principais polimorfos: anatásio e brookita, como representantes de baixas temperaturas e pressões, e rutilo, em média a alta e ultra alta pressões e temperaturas. Desses, o rutilo é o polimorfo mais comum na crosta terrestre. As amostras e lâminas polidas utilizadas nesta pesquisa são oriundas de furos de sondagem realizados pela empresa Rio Tinto Desenvolvimento Minerais (RTZ) no GSJJ. Os polimorfos de  $TiO_2$  são representados por finos (10-100 $\mu$ m) cristais anédricos inclusos ou no entorno de biotitas. As amostras da zona mineralizada apresentam alteração hidrotermal variada, com rochas no estágio de alteração propilítica e fílica. Os polimorfos de  $TiO_2$  formam agregados aciculares ou com textura esquelética, substituindo predominantemente a titanita. Análises pontuais de microsonda eletrônica realizadas em cristais individuais e em agregados de cristais de rutilo indicaram variações composicionais marcantes, principalmente em relação aos conteúdos de Nb, Al, Zr, V e W. Cristais de rutilo da zona estéril (ZE) mostraram maior enriquecimento em Nb (> 5.000 ppm) em relação aos cristais da zona mineralizada (ZM; predominantemente < 3.000 ppm). Cristais de rutilo da ZM mostram um *trend* de enriquecimento em Al e V. Cristais da ZE por vezes exibem enriquecimento em Fe, porém sempre acompanhados com teores consideráveis de Nb. Os cristais da ZM exibem *trend* de enriquecimento em W, V e Sb, e sempre empobrecidos em Nb. Análises em rutilo demonstram que sua composição química pode ser usada para discriminar rochas mineralizadas de outros tipos de rochas não mineralizadas. Os resultados indicam que a composição de elementos traço do rutilo, principalmente o V, em combinação com outros elementos, como Al, Zr, Sb, W oferecem as melhores indicações de mineralização em depósitos de ouro.

**Palavras-chave:** rutilo; depósito São Jorge; MEV; microsonda; Província Mineral do Tapajós.

## ABSTRACT

The Tapajós Mineral Province (PMT), inserted in the context of the Tapajós-Parima or Ventuari-Tapajós geochronological province, is recognized as the largest gold-bearing province in Brazil. The São Jorge Jovem Granite (GSJJ), located east of the PMT in a heavily fractured and hydrothermalized area, hosts gold mineralization. The GSJJ exhibits calcium-alkaline affiliation K-rich, composed of rocks of monzogranitic and leucomonzogranitic composition, with amphibole and biotite as the main mafic minerals. Pb-Pb dating of zircon in leucomonzogranites revealed a crystallization age of  $1891 \pm 3$  Ma.  $\text{TiO}_2$  polymorphs are common accessory phases in several types of rocks. In nature, it occurs in three main polymorphs: anatase and brookite, which are representatives of low temperatures and pressures, and rutile, at medium to high and ultra-high pressures and temperatures. Of these, rutile is the most common polymorph in the Earth's crust. The samples and polished blades used in this research come from drilling holes carried out by Rio Tinto Desenvolvimento Minerais (RTZ) in GSJJ.  $\text{TiO}_2$  polymorphs are represented by thin (10-100 $\mu\text{m}$ ) anhedral crystals in or surrounding biotite. Samples from the mineralized zone show varied hydrothermal alteration, with rocks in the propylitic and phyllic alteration stages.  $\text{TiO}_2$  polymorphs form acicular aggregates or aggregates with a skeletal texture, predominantly replacing titanite. Spot electron microprobe analyses conducted on individual crystals and aggregates of rutile crystals revealed significant compositional variations, particularly concerning the contents of Nb, Al, Zr, V, and W. Rutile crystals from the non-mineralized zone (NMZ) exhibited higher levels of Nb (> 5,000 ppm) compared to crystals from the mineralized zone (MZ; predominantly < 3,000 ppm). Rutile crystals from the MZ display a trend of Al enrichment and V. Crystals from the NMZ sometimes show enrichment in Fe but are always accompanied by levels considered to be Nb. ZM crystals exhibit a trend of enrichment in W, V, and Sb and are always depleted in Nb. Analysis of rutiles demonstrates that their chemical composition can be used to distinguish between mineralized rocks and other types of non-mineralized rocks. The results indicate that the trace element composition of rutile, mainly the V content, and other elements such as Al, Zr, Sb, W, offer the best indications of mineralization in gold deposits.

**Keywords:** rutile; São Jorge deposit; SEM; microprobe; Tapajós Mineral Province.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Mapa de localização e acesso ao depósito São Jorge (Borges 2010).....3
- Figura 2- Cráton Amazônico e suas Províncias Geocronológicas. (a) Segundo Tassinari & Macambira (2004). (b) Conforme Santos *et al.* (2008). Modificado de Oliveira et al. (2018).10
- Figura 3. Mapa geológico do plúton São Jorge com as idades obtidas para suas diferentes fácies e rochas vulcânicas encaixantes (Fm. Vila Riozinho); destaque para o depósito São Jorge. Modificado de Lamarão *et al.* (2008).....18
- Figura 4- (A) Mapa de localização da região de Vila Riozinho, PMT, com destaque para o dep. de ouro São Jorge. (B) Detalhe da área do depósito com a localização dos furos de sondagem estudados (em azul). Modificado de Borges *et al.* (2009).....19
- Figura 5- Bloco diagrama do controle estrutural da mineralização no depósito São Jorge. A interseção dos veios principais (tipo Y, sinistral) e extensionais (tipo T, gash) formam “charutos” de alto teor de sulfetos e ouro. (modificado de Borges 2010, que adaptou do modelo da Talon Metals) (Vasquez *et al.* 2017).....20
- Figura 6- Esquema da zona de alteração hidrotermal e distribuição da mineralização de ouro no depósito São Jorge. A mineralização de alto teor ocorre nos veios de quartzo sulfetados e de sulfeto maciço, enquanto o ouro disseminado ocorre nas zonas de alteração sericitica e clorítica. (modificado de Borges 2010, que adaptou do modelo da Talon Metals).....21
- Figura 7- Zona estéril (ZE) e mineralizada (ZM) do depósito São Jorge. (A1 e A2) fotografia dos testemunhos de sondagem; a ZE (A1) apresenta textura ígnea inequigranular, enquanto a ZM (A2) exhibe cor esverdeada com pontos amarelados, feldspatos alterados e veios de quartzo; (B1) ZE com textura inequigranular hipidiomórfica com fenocristais de k-feldspato, biotitas e hornblendas preservadas; (B2) ZM hidrotermalizada com quartzos hidrotermais bem desenvolvidos, minerais carbonáticos e sericitizados; (C1) imagem de elétrons retroespalhados (ERE) exibindo cristais de TiO<sub>2</sub> em contato com biotita, fluorita e quartzo; (C2) imagem de ERE mostrando quartzo, clorita e TiO<sub>2</sub> em pseudomorfo de titanita (textura esquelética).....22
- Figura 8- Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) exemplificando a morfologia dos rutilos e titanitas presentes nas zonas não mineralizadas ou estéreis (ZE). (a), (b) e (c) mostrando rutilos alotriomórficos em contato ou alterando biotitas; e (d) titanita idiomórfica e hipidiomórfica sem alterações aparentes.....23

- Figura 9- Imagens de ERE exemplificando a morfologia dos rutilos presentes na zona mineralizada (ZM). (a) e (b) rutilos xenomórficos provenientes da alteração de titanitas; (c) rutilos hipidiomórficos em contato com mica branca (Mc) e (d) rutilos aciculares inclusos em cristais de quartzo.....24
- Figura 10- Imagem de elétrons retroespalhados (canto superior esquerdo) e mapa de elementos (Ca, Ti, Fe, Si e Al) obtidos com MEV em titanita parcialmente alterada. O titânio brilha em maior intensidade nas bordas do mineral (lilás mais intenso), indicando a presença de um polimorfo de TiO<sub>2</sub>, mesma região onde Ca (azul claro) e Si (laranja) não estão presentes.. . . . . 25
- Figura 11- Imagem de elétrons retroespalhados (canto superior esquerdo) e mapa de elementos (Ca, Ti, Fe, Si e Al) obtidos em MEV em titanita intensamente alterada. O titânio é o elemento dominante no cristal (azul claro intenso), indicando a presença de um polimorfo de TiO<sub>2</sub>, mesma região onde Ca (lilás) e Si (verde claro) não estão presentes ou ocorrem de maneira subordinada.....26
- Figura 12- Análise por difração de raios-X (DRX) que indicou possível coexistência entre os polimorfos rutilo e anatásio no granito São Jorge Jovem.....28
- Figura 13- Imagem EBSD (Band Contrast + Phase Map) mostrando os polimorfos do rutilo presente na amostra. É possível observar que o TiO<sub>2</sub> que substituiu a titanita é, predominantemente, rutilo.....29
- Figura 14- Imagem EBSD (Band Contrast + Phase Map) mostrando que o rutilo é o polimorfo de TiO<sub>2</sub> dominante alterando o cristal de titanita.....30
- Figura 15- Diagramas binários de análises em rutilo no GSJJ em cristais da zona mineralizada (losango amarelo) e zona estéril (x vermelho). Os diagramas mostram o comportamento de alguns elementos na ZM e ZE em relação ao nióbio. (a) Diagrama Al vs Nb ppm; (b) V vs Nb ppm; (c) Fe vs Nb; (d) Zr vs Nb ppm; (e) W+V+Sb vs Nb ppm; (f) W vs Nb ppm.....39
- Figura 16- Análises em rutilo no GSJJ em cristais das zonas mineralizada (losango amarelo) e estéril (x vermelho). (A) Os rutilos da zona mineralizada mostram conteúdos mais elevados de V e W, enquanto os da zona estéril confirmam um maior enriquecimento em Nb. (B) Os rutilos da zona mineralizada plotam predominantemente no centro do diagrama, confirmando seu maior enriquecimento em Zr+W+V+Al+Sb, enquanto os da zona estéril se aproximam do vértice Fe+Cr+Nb. Concentrações em ppm.....40

- Figura 17- Diagrama proposto por Agangi *et al.* (2019) com dados obtidos neste trabalho para o GSJJ. Losango amarelo: rutilos da zona mineralizada; x vermelho: rutilo da zona estéril. .... 43
- Figura 18- Diagrama proposto por Sciuba & Beaudoin (2021) com dados obtidos neste trabalho para o GSJJ. Losango amarelo: rutilos da zona mineralizada; x vermelho: rutilo da zona estéril. Os rutilos da ZE e ZM do GSJJ são compatíveis com aqueles apresentados pelos autores do diagrama.....44
- Figura 19- Diagrama proposto por Sciuba & Beaudoin (2021) com rutilos deste trabalho (Losango amarelo: rutilos da ZM; x vermelho: rutilo da ZE). Os rutilos da ZE e ZM do GSJJ se sobrepõem aos rutilos de depósitos metamórfico-hidrotermais e hidrotermais apresentados pelos autores do diagrama.....45

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Relação das lâminas classificadas a partir de petrografia microscópica e a zona do depósito a qual cada uma representa.....	5
Tabela 2- Elementos analisados, padrões e cristais analisadores utilizados nas análises de WDS em rutilo.....	7
Tabela 3- Síntese dos dados geocronológicos da PMT (Adaptado de Vasquez <i>et al.</i> 2017).....	14
Tabela 4- Análises representativas em microsonda eletrônica de cristais de rutilo estudados . .....	31

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iv
<b>EPÍGRAFE</b> .....	vi
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 MATERIAIS E METODOLOGIA .....	4
<b>1.4.1 Pesquisa Bibliográfica</b> .....	4
<b>1.4.2 Petrografia</b> .....	4
<b>1.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	5
<b>1.4.4 Análises por Difração de Raios X (DRX)</b> .....	5
<b>1.4.5 Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD)</b> .....	6
<b>1.4.6 Microsonda Eletrônica</b> .....	6
1.5 RUTILO – CARACTERÍSTICAS BÁSICAS E IMPORTÂNCIA COMO INDICADOR METALOGENÉTICO .....	7
<b>2 CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	9
2.1 ASPECTOS GERAIS E COMPARTIMENTAÇÃO DO CRÁTON AMAZÔNICO .....	9
2.2 GEOLOGIA DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS .....	10
<b>2.2.1 Associações de embasamento</b> .....	11
<b>2.2.2 Vulcano-Plutonismo Paleoproterozoico</b> .....	11
<b>2.2.3 Coberturas Sedimentares Paleoproterozoicas</b> .....	16
<b>2.2.4 Magmatismo Máfico Proterozoico e Fanerozoico</b> .....	16
2.3 GEOLOGIA DA REGIÃO DE VILA RIOZINHO .....	16
<b>2.3.1 Granito São Jorge Antigo</b> .....	17
<b>2.3.2 Granito São Jorge Jovem</b> .....	17

<b>3 RESULTADOS</b> .....	22
3.1 PETROGRAFIA E TEXTURA DAS ROCHAS HOSPEDEIRAS .....	22
3.2 MORFOLOGIA DOS POLIMORFOS DE $TiO_2$ .....	23
3.3 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) .....	27
3.4 DIFRAÇÃO DE ELETRONS RETROESPALHADOS - MEV-EBSD .....	29
3.5 MICROANÁLISES POR DISPERSÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA – WDS .....	30
3.6 DIAGRAMAS GEOQUÍMICOS .....	38
<b>4 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES</b> .....	41
4.1 MORFOLOGIA.....	41
4.2 QUÍMICA MINERAL.....	42
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	48

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

A busca pelo ouro e outros metais raros sempre foi tida como prioridade nas grandes civilizações durante a história humana. Da invasão *viking* ao mar mediterrâneo no século VII, à chegada dos portugueses ao Brasil, o ouro foi e continua sendo uma matéria-prima fundamental para a sociedade. Com o passar do tempo, grandes reservas deste minério têm se tornado cada vez mais escassas, fazendo com que pesquisadores da área busquem por novas técnicas de prospecção.

A Província Mineral do Tapajós (PMT) é reconhecida como a maior província aurífera do Brasil. Os primeiros relatos de exploração foram registrados em meados de 1958, com a extração essencialmente em pequenos depósitos secundários de alto teor e baixa tonelagem (Dardenne & Schobbenhaus 2001, Juliani *et al.* 2014, Vasquez *et al.* 2017). Posteriormente, em meados da década de 90, muitas empresas de mineração (ex. Rio Tinto Mineradora, Companhia Vale do Rio Doce, Codelco do Brasil Mineração LTDA, Eldorado Mineração LTDA) direcionaram a busca pela mineralização primária do ouro, com o objetivo de encontrar depósitos economicamente viáveis, o que resultou na exploração de algumas reservas nacionalmente conhecidas como os depósitos Tocantinzinho e Palito, o campo mineralizado do Cuiú-Cuiú e o depósito São Jorge, todos inseridos na PMT (Juliani *et al.* 2014, Vasquez *et al.* 2017).

Na região de Vila Riozinho, município de Novo Progresso (sudoeste do Pará), ocorrem os granitos São Jorge Antigo (GSJA), com idades de cristalização de  $1983 \pm 8$  Ma e  $1981 \pm 2$  Ma, e São Jorge Jovem (GSJJ), com idade de  $1891 \pm 3$  Ma, intrusivo no GSJA. Na porção central, onde há intensa hidrotermalização, localiza-se o depósito São Jorge (Lamarão *et al.* 2002, 2005).

Borges *et al.* (2009) definiram quatro principais associações minerais que representam os diferentes estágios de evolução das rochas pertencentes ao GSJJ. Os autores observaram que a mineralização está associada com os processos hidrotermais encontrados no depósito.

A Associação 1, formada no estágio magmático, é caracterizada pela presença de Mg-hornblenda e actinolita e andesina-oligoclásio (Lamarão *et al.* 2004) com características primárias preservadas. A Associação 2 é caracterizada por uma alteração pós-magmática incipiente, com substituição total do anfibólio por minerais como clorita + carbonatos + óxidos de Fe e Ti e titanita  $\pm$  biotita  $\pm$  epidoto e intensa saussuritização do plagioclásio primário; o epidoto é uma fase marcante, enquanto a biotita ocorre parcialmente cloritizada. A Associação

3 é marcada pela presença constante de clorita e plagioclásio albítico, além de mica branca e raras biotitas. A Associação 4 é dominada por mica branca, pirita e carbonatos, resultado de alteração sericítica com carbonatação associada. As duas últimas associações são descritas pelos autores como relacionadas aos processos hidrotermais que originaram a mineralização de sulfetos e ouro do depósito São Jorge.

O uso de guias prospectivos para auxiliar na prospecção aurífera abrange um leque diversificado de opções, com base no tipo de depósito e peculiaridades de cada região. Em depósitos hidrotermais, as técnicas de amostragem buscam alterações hidrotermais típicas, ou o metal propriamente dito.

Atualmente, a geoquímica de certos minerais acessórios (ex. zircão, apatita, rutilo) tem demonstrado que é possível diferenciar rochas mineralizadas de estéreis.

Esses minerais podem incorporar elementos indicadores (pathfinders) de depósitos minerais. Através de análises químicas precisas e interpretações adequadas, é possível identificar variações nos teores de certos elementos químicos (como Bi, Te, Sb, Sn, V e W) quando comparados aos minerais de rochas similares estéreis.

A presente dissertação está compartimentada em quatro Tópicos. Um tópico introdutório denominado Tópico 1, que aborda a apresentação, localização da área de estudo, os objetivos e as metodologias utilizadas neste trabalho. O Tópico 2 trata do contexto geológico, no qual é descrita uma breve síntese da Geologia Regional da PMT, assim como a geologia da região de Vila Riozinho, onde está localizado o depósito São Jorge, objeto deste estudo. No Capítulo 3 são apresentados os resultados obtidos nesta dissertação. O Capítulo 4 consiste nas discussões e conclusões, onde são comparados os resultados obtidos neste trabalho com os da literatura atual acerca do tema, além de elencar as principais vantagens e limitações do uso desta ferramenta em estudos metalogenéticos.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região de Vila Riozinho está situada geograficamente na porção central da PMT, no município de Novo Progresso, a cerca de 300 km ao sul da cidade de Itaituba, e abrange as localidades de Jardim do Ouro, Moraes Almeida e Vila Riozinho (Figura 1). Os principais acessos para a região são pela rodovia BR-163 (rodovia Cuiabá-Santarém) ou por malha aérea em uma hora de vôo em aviões de pequeno porte partindo de Itaituba.

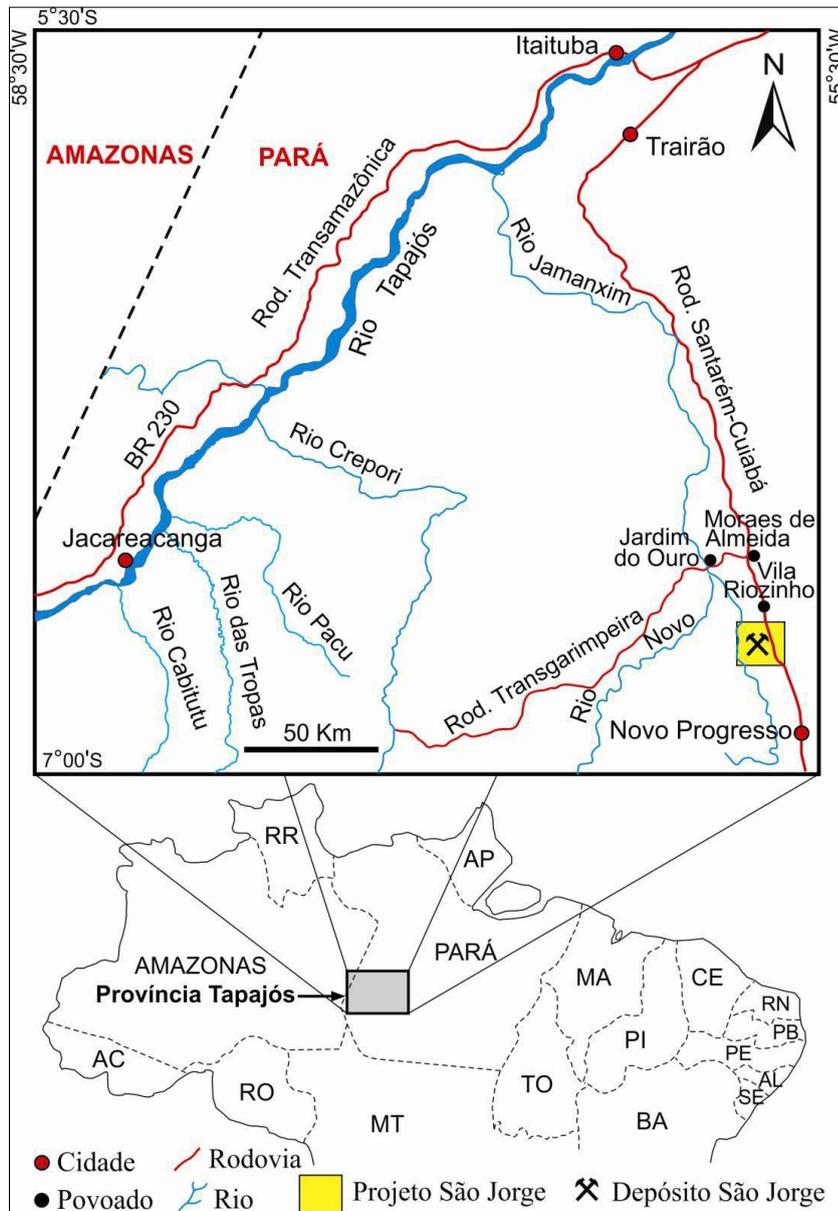


Figura 1- Mapa de localização e acesso ao depósito São Jorge (Borges 2010).

### 1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é utilizar composições de rutilo como indicadores (*pathfinders*) de mineralizações de Au, tomando como exemplo o depósito de ouro São Jorge, hospedado no Granito São Jorge Jovem (GSJJ), na Província Mineral do Tapajós. Para isso, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a petrografia meso e microscópica para identificar zonas mineralizadas e estéreis;
- Diferenciar o rutilo dos demais polimorfos de  $\text{TiO}_2$  por meio de análises de difração

de elétrons retroespalhados (EBSD - *Electron Backscattered Diffraction*);

- Determinar as características morfológicas e composicionais dos rutilos presentes nas zonas mineralizadas e não mineralizadas do GSJJ;
- Identificar uma possível assinatura geoquímica de elementos “indicadores” de mineralizações de Au (ex: Cu, Nb, Sb, W, Zn) presentes em cristais de rutilo do depósito São Jorge.

#### 1.4 MATERIAIS E METODOLOGIA

As amostras utilizadas nesta pesquisa são oriundas de furos de sondagem realizados pela empresa Rio Tinto Desenvolvimento Minerais (RTZ) no GSJJ do depósito São Jorge, na região de Vila Riozinho, Município de Novo Progresso - PA). Para o pleno desenvolvimento deste trabalho, os procedimentos e técnicas utilizadas estão descritas abaixo:

##### 1.4.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi realizada durante todo o desenvolvimento deste trabalho e incluiu a leitura de publicações científicas, dissertações e teses sobre geologia e metalogenia da área de estudo, além de técnicas de microanálise em minerais acessórios, especialmente rutilo, como guia para mineralizações auríferas.

##### 1.4.2 Petrografia

Nesta etapa foram utilizadas lâminas polidas confeccionadas a partir de amostras dos testemunhos de sondagem correspondentes aos furos FSJ-02, FSJ-04, FSJ-06, FSJ-07 e FSJ-09 do GSJJ (Tabela 1). A análise petrográfica por luz transmitida foi realizada em um microscópio Leica DM4 no Laboratório de Microanálises do IG-UFPA. O objetivo foi identificar associações minerais descritas por Borges *et al.* (2009), selecionar cristais de TiO<sub>2</sub> e classificar as regiões das lâminas para etapas posteriores.

Após a análise micropetrográfica, foram selecionadas onze lâminas polidas, sendo cinco da zona estéril (ZE), e seis da zona mineralizada (ZM), como mostra a tabela abaixo:

Tabela 1- Relação das lâminas classificadas a partir de petrografia microscópica e a zona do depósito a qual cada uma representa. ZM: zona mineralizada; ZE: zona estéril.

<b>Lâminas polidas</b>	<b>Zonas estudadas</b>
FSJJ02-25	ZM
FSJJ02-39	ZM
FSJJ02-40	ZM
FSJJ04-29	ZE
FSJJ04-31	ZE
FSJJ06-12	ZM
FSJJ06-25	ZM
FSJJ07-36	ZE
FSJJ09-07	ZM
FSJJ09-01	ZE
FSJJ09-17	ZE

### 1.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A partir da distinção das regiões com maiores concentrações de polimorfos de  $TiO_2$  com base na petrografia, foi realizado imageamento por elétrons retroespalhados (ERE) e análises semiquantitativas em EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). As análises de ERE e EDS foram realizadas no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências (IG) da UFPA.

O equipamento utilizado foi um MEV Zeiss modelo SIGMA-VP com EDS IXRF, modelo Sedona-SD acoplado, pertencente ao Instituto Tecnológico Vale (ITV), cedido em contrato de comodato para a UFPA. As condições de operação foram: corrente do feixe de elétrons = 80  $\mu A$ , voltagem de aceleração constante = 20 kV, distância de trabalho = 8,5 mm, tempo de contagem para análise dos elementos = 30 s.

Para as análises no MEV, as lâminas foram metalizadas com carbono no metalizador Quórum Q150T-ES em cinco pulsos de dois segundos cada, resultando numa camada de aproximadamente 20nm.

### 1.4.4 Análises por Difração de raios X (DRX)

As amostras utilizadas nesta etapa consistiram em fragmentos de testemunhos de sondagens correspondentes às lâminas analisadas em todas as fases deste trabalho. Os fragmentos foram pulverizados em um almofariz de ágata. As análises por difração foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM-IG) da Universidade Federal do

Pará, com o auxílio de um difratômetro de raios-X da marca PANalytical, modelo Empyrean, com tubo de raios-X cerâmico de anodo de cobalto ( $K\alpha_1 = 1,78901 \text{ \AA}$ ), com foco fino longo e filtro  $K\beta$  de ferro. Foi utilizado um detector PIXcel 3D - Medpix3 1x1, operando no modo scanning.

As condições de análise abrangeram: voltagem de 40 kV, corrente de 35mA, tamanho do passo de  $0,02^\circ$  em  $2\theta$ , varredura de  $5^\circ$  a  $79^\circ$  em  $2\theta$ , 78,2 s de tempo/passo, fenda divergente de  $1/4^\circ$ , anti-espalhamento de  $1/2^\circ$  e máscara de 10mm. Para a interpretação dos dados de raios-X, foi utilizado o programa x'pert datacollector, versão 4.4 da PANalytical.

#### **1.4.5 Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD)**

Após a seleção das áreas de interesse, as respectivas lâminas polidas foram analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado a um sistema de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD). Durante o procedimento, as amostras foram posicionadas em um porta-amostras pré-inclinado de modo que a incidência do feixe de elétrons estivesse a  $20^\circ$  da superfície da amostra.

Para obter resultados mais precisos, foi essencial o alinhamento correto da amostra em relação ao feixe de elétrons, otimizando a difração e a qualidade dos padrões cristalográficos obtidos. As análises por EBSD foram realizadas no Instituto LACTEC, em colaboração com a Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Para a análise de rochas, o método EBSD (Electron Backscatter Diffraction) geralmente requer ângulos de inclinação iguais ou superiores a  $70^\circ$  em relação à horizontal (Randle, 2004).

O EBSD baseia-se na difração de elétrons retroespalhados em planos cristalográficos, gerando padrões de difração conhecidos como EBSP (Electron Backscatter Diffraction Patterns), que são projetados em uma tela de fósforo. Esses padrões são capturados por um sensor CCD e processados pelo software AZtec (Oxford Instruments).

A simetria dos padrões de difração permite a identificação do sistema cristalino da fase mineral analisada (Prior *et al.* 1998), possibilitando, por exemplo, a diferenciação de polimorfos de  $TiO_2$  em uma mesma amostra.

#### **1.4.6 Química Mineral**

A partir dos resultados obtidos nas etapas anteriores, foram realizadas análises químicas pontuais por WDS (*wavelength dispersive spectroscopy*) em cristais de rutilo com o intuito de determinar quantitativamente elementos indicadores do ouro. As análises por WDS foram

realizadas no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da UFPA. O equipamento utilizado foi uma microsonda eletrônica JEOL modelo JXA-8230, equipada com 5 espectrômetros WDS. As condições de operação foram: voltagem de aceleração constante = 20 kV, corrente do feixe de elétrons = 120 nA, diâmetro do feixe de elétrons = 5  $\mu$ m, método de correção dos efeitos de matriz = ZAF, distância de trabalho = 11 mm, e tempo de contagem para análise de Ti e demais elementos = 5 s e 240 s, respectivamente. Os elementos analisados, padrões e cristais analisadores utilizados estão discriminados na tabela a seguir:

Tabela 2- Elementos analisados, padrões e cristais analisadores utilizados nas análises de WDS em rutilo.

<b>Elementos</b>	<b>Padrões</b>	<b>Cristais analisadores</b>
Nb	Nb	TAP
Si	SiO <sub>2</sub>	TAP
Al	Espinélio	TAP
Zr	Zircão	TAP
W	W	TAP
Ta	Ta	TAP
Ti	Rutilo	PETJ
Ca	Wollastonita	PETJ
Sn	Cassiterita	PETJ
Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	LIF
Mn	Rhodonita	LIF
Cr	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LIFH
V	Vanadinita	LIFH
Sb	InSb	LIFH

### 1.5 RUTILO: CARACTERÍSTICAS BÁSICAS E IMPORTÂNCIA COMO INDICADOR METALOGENÉTICO

O titânio (<sup>22</sup>Ti), metal de transição leve conhecido pela sua resistência à corrosão, é o nono elemento mais abundante da crosta continental terrestre, com uma concentração de TiO<sub>2</sub> estimada em 0,7% (Rudnick & Fountain 1995). Os minerais mais importantes de titânio são rutilo (TiO<sub>2</sub>), ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>) e titanita (CaTiSiO<sub>5</sub>).

O rutilo é a mais abundante das cinco formas de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) encontradas na natureza. O dióxido de titânio também é encontrado sob a forma de brookita, anatásio, akaogiita e riesita, estes dois últimos polimorfos de alta pressão relacionados a impactos de meteoritos (El Goresy *et al.* 2010, Tschauner & Ma 2017).

O nome rutilo foi utilizado pela primeira vez pelo geólogo Alemão Abraham Gottlob Werner em 1800, considerado o “pai da Geologia alemã” (Lampadius 1800, Ludwig 1803,

Werner 1911 *apud* Meinhold 2010; Mindat.org 2020). A origem do nome é derivada do latim *rutilus*, que significa avermelhado, devido à cor vermelha-escura observada em algumas espécies sob luz transmitida. Entretanto, cores amareladas e acastanhadas também são comuns neste mineral, além das variações translúcidas ou opacas.

Embora a fórmula principal do rutilo seja  $\text{TiO}_2$ , o titânio é habitualmente substituído por vários outros elementos como Al, V, Cr, Fe, Zr, Nb, Sn, Sb, Hf, Ta, W e U. A geoquímica do rutilo tem gerado valiosas informações, visto que ele é o principal mineral hospedeiro de elementos de alto potencial iônico (*high field strength elements*-HFSE), frequentemente utilizados como indicadores geoquímicos de processos magmáticos, metamórficos e hidrotermais (Rice *et al.* 1998; Bromiley & Hilairet 2005; Scott 2005; Luvizotto *et al.* 2009; Plavsa *et al.* 2018). Além disso, a incorporação de zircônio na estrutura cristalina do rutilo está diretamente condicionada à temperatura e pressão, o que permitiu o desenvolvimento de geotermômetros de Zr em rutilo. As variações na composição química presentes neste mineral podem ajudar a determinar características específicas de sua rocha hospedeira, além de permitir que propriedades físicas e químicas reinantes durante a formação do rutilo sejam identificadas (Meinhold 2010).

Atualmente, a análise da composição química do rutilo é realizada por duas técnicas principais: espectroscopia de dispersão de comprimento de onda (WDS) em microsonda eletrônica e espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado por ablação a laser (LA-ICP-MS). Essas metodologias permitem a identificação de pequenas variações na composição elementar do mineral, fornecendo dados quantitativos de alta precisão sobre sua geoquímica.

Nos últimos anos, o uso da geoquímica de rutilo para diferenciar regiões mineralizadas de estéreis em diferentes tipos de rochas tem ganhado notoriedade (ex. Clark & Williams-Jones 2004; Salama *et al.* 2018; Scott 2005; Sciuba & Beaudoin 2021). Em depósitos orogênicos, rutilos de origem hidrotermal podem conter certos elementos traço característicos, em particular concentrações elevadas de antimônio (Agangi *et al.* 2019).

## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1 ASPECTOS GERAIS E COMPARTIMENTAÇÃO DO CRÁTON AMAZÔNICO

O Cráton Amazônico está localizado ao norte da Plataforma Sul-Americana, e é constituído pelo escudo das Guianas e do Brasil Central, separados pelas Bacias sedimentares paleozoicas do Solimões e Amazonas. Trata-se de uma das principais Unidades Geocronológicas da plataforma, cujo surgimento é atribuído ao Arqueano (Almeida *et al.* 1981, 2000; Tassinari & Macambira 1999; Tassinari *et al.* 2000). Em termos geográficos, o Cráton Amazônico abrange parte da região norte do Brasil, e sul da Guiana Francesa, Guiana, Suriname, Venezuela, Colômbia e leste da Bolívia.

A compreensão acerca da evolução geotectônica do Cráton Amazônico não está plenamente definida. Entretanto, nas últimas décadas, alguns autores apresentaram subdivisões com base em dados principalmente geocronológicos para a região. Neste trabalho, destacam-se os dois principais modelos de compartimentação para o Cráton Amazônico (Figura 2).

Tassinari e Macambira (1999, 2004) propuseram a formação de seis províncias geocronológicas para o Cráton Amazônico (Figura 1A): Amazônia Central (> 2,5 Ga), Maroni-Itacaiúnas (2,2 - 1,9 Ga), Ventuari-Tapajós (1,9 - 1,8 Ga), Rio Negro-Juruena (1,8 - 1,55 Ga), Rondoniana-San Ignácio (1,55 - 1,3 Ga), e Sunsás (1,25 - 1,0 Ga). Segundo estes autores, dados geocronológicos indicam que a Província Amazônia Central seria uma espécie de “protocráton” de origem arqueana que teria sido formada a partir da colisão de microcontinentes posteriormente amalgamados por processos orogênicos durante o Paleoproterozoico. Os autores afirmam, ainda, que parte das províncias Maroni-Itacaiúnas e Rondoniana-San Ignácio e quase a totalidade das províncias Ventuari-Tapajós e Rio Negro-Jurema originaram-se de materiais com derivação mantélica e evoluíram através de arcos magmáticos. A província Sunsás, mais recente, seria resultado de processo colisionais envolvendo retrabalhamento de rochas preexistentes.

Com base principalmente em idades U-Pb entre 3,1 e 0,99 Ga, Santos *et al.* (2000, 2002, 2004, 2006, 2008) dividem o Cráton Amazônico em oito províncias geotectônicas (Figura 1B). Os autores atribuem a origem das províncias Carajás-Imataca, Transamazônica, Tapajós-Parima, Rondônia e Juruena a ambientes de arcos acrescionários, enquanto as províncias Amazônia Central, Rio Negro e Sunsás estariam associadas a ambientes de colisão continental.

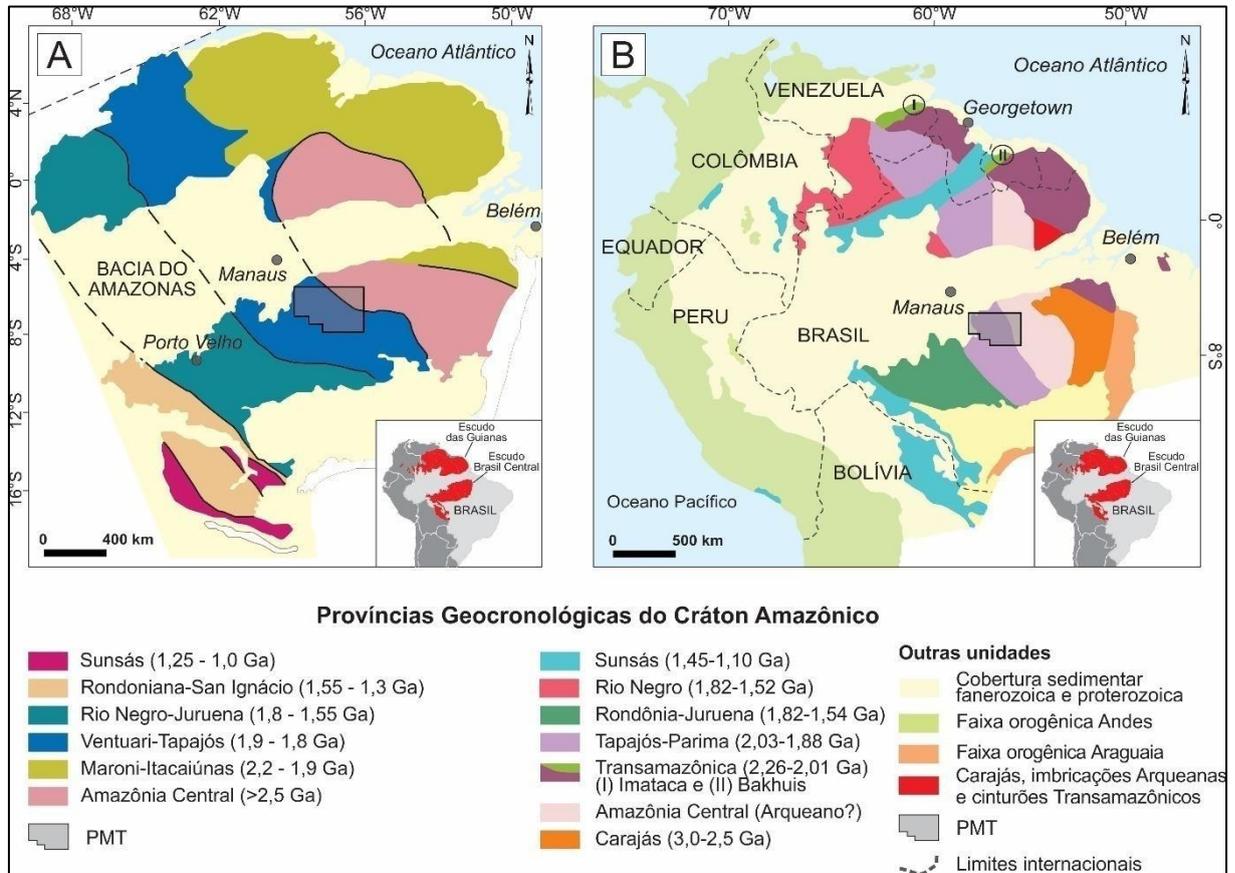


Figura 2- Crátão Amazônico e suas Províncias Geocronológicas. (a) Segundo Tassinari & Macambira (2004). (b) Conforme Santos *et al.* (2008). Modificado de Oliveira *et al.* (2018).

## 2.2 GEOLOGIA DA PROVÍNCIA MINERAL DO TAPAJÓS

A Província Mineral do Tapajós (PMT; Figura 2), anteriormente denominada de Província Aurífera do Tapajós (Faraco *et al.* 1996), conquistou esta nomenclatura por abrigar uma numerosa gama de depósitos magmático-hidrotermais e metamórfico-hidrotermais de ouro, com associação de Ag, Cu, Pb, Zn, Bi e Mo, além de ocorrências e indícios de Sn e diamante. Está situada entre as províncias Ventuari-Tapajós (ou Tapajós-Parima) e a borda oeste da Província Amazônia Central. Os limites da PMT confundem-se, de maneira geral, aos do Domínio Tapajós. Politicamente, a PMT está inserida nos municípios de Itaituba, Jacareacanga, Novo Progresso e Trairão, no Estado do Pará. (Santos *et al.* 2001, Vasquez *et al.* 2008; 2017).

A PMT é composta predominantemente por rochas plutônicas e vulcânicas paleoproterozoicas com afinidades cálcio-alcálica e alcalina. Klein & Vasquez (2000) dividiram em dois principais domínios: (1) orogênico, localizado na região sul-sudoeste, contendo as rochas mais antigas afetadas por uma tectônica compressiva-transpressiva com

idade entre 2040 e 1880 Ma, e (2) um evento de caráter extensional relacionado à colocação de plútons alcalinos de arcos magmáticos anorogênicos na região leste-nordeste, de magmatismo alcalino intracontinental entre 1880 Ma e 1780 Ma (Santos *et al.* 2000; 2001; 2004; Vasquez *et al.* 2002; 2008).

### 2.2.1 Associações de embasamento

O embasamento da PMT é formado pelo Grupo Jacareacanga. Trata-se de sequências vulcanossedimentares que ocorrem na porção oeste da província, orientadas predominantemente NW-SE a NNW-SSE e com idades U-Pb de 2,1 Ga obtidas em zircões detríticos (Vasquez *et al.* 2008; Vasquez *et al.* 2017; Tabela 3). Litologicamente, Almeida *et al.* (2001) propuseram três unidades principais: (1) sequência metaturbidítica, distribuída na porção leste do Grupo, sendo considerada como a sequência superior; (2) rochas metassedimentares químicas, e formação ferrífera intercaladas nos metaturbiditos; e (3) metabasaltos oceânicos representados por actinolita e clorita xistos a oeste, representando a sequência inferior deste grupo. Datações em U-Pb de zircões detríticos dos metaturbiditos do Grupo Jacareacanga indicaram idades entre 2875 e 2008 Ma. O intervalo entre 2125 e 2098 Ma foi considerado como indicativo do possível magmatismo relacionado ao rifteamento das bacias oceânicas, onde foram depositadas as rochas do Grupo Jacareacanga (Santos *et al.* 2004).

O Complexo Cuiú-Cuiú é formado por ortognaisses predominantemente tonalíticos e granodioríticos bandados e alongados segundo o *trend* regional NW-SE (Klein *et al.* 2001; Vasquez *et al.* 2002). Apresentam composição tonalítica, diorítica a granodiorítica, com xenólitos de metabasaltos e metandesitos, por vezes cortados por veios trondhjemiticos. Esses batólitos são alongados e irregulares, mas concordantes com a orientação regional NW-SE, paralela à foliação das rochas do Grupo Jacareacanga (Almeida *et al.* 2001; Ferreira *et al.* 2000). O Complexo Cuiú-Cuiú forma contatos por cavalgamentos oblíquos com as rochas do Grupo Jacareacanga, e são intrudidos pelas suítes graníticas Parauari e Maloquinha (Almeida *et al.* 1999). Datações geocronológicas U-Pb (SHRIMP) em cristais de zircão forneceram idade entre  $2033 \pm 7$  e  $2005 \pm 7$  Ma para estas rochas (Santos *et al.* 2000, 2001; Tabela 3). Vasquez *et al.* (2008) sugerem que o Grupo Jacareacanga e o Complexo Cuiú-Cuiú estiveram relacionados à subducção de placa oceânica e formaram o arco magmático Cuiú-Cuiú, baseados pelas estruturas de cavalgamento e feições de migmatização encontradas nessas rochas.

### 2.2.2 Vulcano-Plutonismo Paleoproterozoico

O Orosiriano é bem representado na PMT, no qual foram registradas diversas atividades

Vulcano-plutônicas que ocorrem nas porções central, sudeste e leste da província. A Formação Vila Riozinho ocorre na parte leste da província. É representada por andesitos basálticos, traquiandesitos basálticos traquitos e riolitos, com uma assinatura cálcio- alcalina de alto K a shoshonítica, similar à de arcos magmáticos maduros, datados de aproximadamente 2000 Ma (Lamarão *et al.* 2002; Tabela 3). O Granito São Jorge Antigo ocorre intrudindo as rochas da Formação Vila Riozinho; este plúton consiste em geral de monzogranitos, com subordinados quartzo-monzonitos e quartzo-monzodioritos, sem deformação dúctil, com afinidade cálcio alcalina de alto K e idades de cristalização entre 1983 e 1981 Ma (Lamarão *et al.* 2002, 2005; Tabela 3).

A Suíte Intrusiva Creporizão ocorre na porção central e sudeste da província, cortando as rochas do Complexo Cuiú-Cuiú. São essencialmente corpos graníticos com variada intensidade de milonitização, orientados em zonas de cisalhamento transcorrentes NW-SE. Trata-se de sienogranitos e monzogranitos com biotita e, por vezes, anfibólio, além de subordinados granodioritos e quartzo-monzodioritos. Estas rochas também apresentam enclaves microgranulares máficos relacionados à mistura de magmas tipo *mingling*, diques sinplutônicos e xenólitos de ortognaisses. Os granitoides Creporizão foram interpretados como parte de um arco magmático continental tipo andino (Santos *et al.* 2001, 2004). Lamarão *et al.* (2002) estudaram o plúton granítico São Jorge Antigo, o qual representa uma atividade magmática precoce relacionada ao arco magmático Creporizão. Os granitos desta suíte forneceram idades de cristalização entre 1997 e 1957 Ma (Tabela 3); o Granito São Jorge Antigo corresponde a um plúton granítico não deformado pertencente a esta suíte (Vasquez *et al.* 2017).

A Suíte Intrusiva Tropas aflora no oeste da província; são tonalitos, quartzo dioritos, granodioritos, andesitos e basaltos. Os granitoides da Suíte Intrusiva Tropas apresentam assinatura cálcio-alkalina de arco de ilha e representam, assim, o Arco Magma Tropic (Santos *et al.* 2004). O Granito São Jorge Jovem, que aflora como intrusões de monzogranitos no Granito São Jorge Antigo, apresenta afinidade cálcio-alkalina de alto K e idade de cristalização de 1891 Ma (Tabela 3) e pode ser correlato a esta suíte (Juliani *et al.* 2014; Vasquez *et al.* 2017).

O Grupo Iriri representa o vulcanismo paleoproterozoico e ocorre com maior frequência na porção oriental da PMT. Neste Grupo foram individualizadas quatro formações. (1) Formação Salustiano, representada por derrames rochas vulcânicas ácidas (riolitos a dacitos), (2) Formação Aruri, composta de rochas piroclásticas ácidas e epiclásticas; (3) Formação Bom Jardim que abriga andesitos, basaltos, latitos, traquitos e dacitos, cálcio-alkalinos de alto K a shoshonítico (tipo I), e (4) Formação Moraes Almeida que apresenta

ignimbritos e riolitos de afinidade alcalina tipo A. Essas rochas são semelhantes às da Formação Santa Rosa na região de São Félix do Xingu, que foram definidas como parte de um vulcanismo fissural (por ex. Pessoa *et al.* 1977; Almeida *et al.* 2000; Lamarão *et al.* 2002; Juliani & Fernandes 2010; Fernandes *et al.* 2011).

A Suíte Intrusiva Parauari, com idades entre 1883 e 1879 Ma (Tabela 3), é o evento plutônico mais expressivo da PMT. São granodioritos com quartzo monzonitos subordinados, tonalitos e quartzo monzodioritos associados. Ocorre, ainda, na forma de corpos monzo e sienograníticos epizonais relacionados às mineralizações auríferas (granitos Palito, Batalha e Rosa de Maio; Juliani *et al.* 2002, 2014; Vasquez *et al.* 2017).

A Suíte Intrusiva Ingarana é representada por um conjunto de corpos máficos a intermediários que afloram nas regiões centro e oeste da província. Ocorrem na forma de augita gabros, gabronoritos, leuconoritos, diabásios e microgabros, com subordinados olivina gabros, quartzo monzogabros, monzodioritos, dioritos, quartzo monzonitos e quartzo sienitos associados. Apresentam afinidades cálcio-alcalina de alto K com idades entre 1893 e 1872 Ma (Almeida *et al.* 2000; Vasquez & Dreher 2011; Tabela 3)

A Suíte Intrusiva Maloquinha ocorre amplamente na província, geralmente com orientação NW-SE a N-S. São sienogranitos e feldspato-alcalino granitos, com subordinados monzogranitos, quartzo-sienitos e quartzo-monzonitos com tendências alcalinas metaluminosas a peralcalinas (Lamarão *et al.* 2002). As rochas da Suíte Intrusiva Maloquinha são transicionais entre granitos tipo I fracionados e granitos tipo A. Estas rochas apresentaram idades paleoproterozoicas ( $1880 \pm 9$  Ma) para rochas pertencentes aos Granitoides Indiferenciados do Tipo I no Domínio Iriri-Xingu. Essas idades são encontradas tanto no Domínio Tapajós quanto no Domínio Iriri-Xingu (Lamarão *et al.* 2002; Semblano *et al.* 2016)

Tabela 3- Síntese dos dados geocronológicos da PMT (Adaptado de Vasquez *et al.* 2017).

(continua)

Associações	Unidade Litoestratigráfica	Idade de Formação / Fontes Detriticas (Ma)	Método
Magmatismos Máficos Proterozoicos e Fanerozoicos	Diabásio Cururu	180 ±4 <sup>11</sup>	K-Ar rt
	Diabásio Piranha*	507 ±4 <sup>10</sup>	U-Pb S bd
	Suíte Intrusiva Cachoeira Seca	1186 ±12 <sup>10</sup>	U-Pb S bd
	Diabásio Crepori	1780 ±7 <sup>10</sup>	U-Pb S bd
Coberturas Sedimentares Proterozoicas	Formação Buiucu (Palmares*)	1879 ±12 <sup>3</sup>	U-Pb S zrd
	Formação Sequeiro*	1901, 1898, 1895, 2065	U-Pb T zrd
	Formação Abacaxis*	1909, 1902, 1899, 1895	U-Pb T zrd
Estateriano	Granito Porquinho	1786 ±14 <sup>8</sup>	U-Pb S zr
Orosiriano	Suíte Intrusiva Maloquinha	1871 ± 8, 1870 ±4, 1864 ±18	U-Pb S zr
		1880 ±9 <sup>5</sup>	Pb-Pb zr
		1882 ±4 <sup>9</sup>	Pb-Pb zr
Paleoproterozoico	Lamprófiro Jamaxim	1536 ±31 <sup>20</sup>	K-Ar rt
	Andesito Joel-Mamoal	–	–
	Gabro Rio Novo	1872 ±8 <sup>13</sup>	Pb-Pb zr
	Anortosito Jutai*	1878 ±8 <sup>3</sup>	U-Pb S ti
	Suíte Intrusiva Ingarana	1881 ±11 <sup>8</sup>	U-Pb S bd
		1881 ±3, 1880 ±7 <sup>8</sup>	U-Pb S zr
		1887 ± 3 <sup>7</sup>	Pb-Pb zr
	Diabásio Teodorico*	1893 ±10 <sup>10</sup>	U-Pb S zr
	Granito Água Branca*	1877 ±15 <sup>22</sup>	U-Pb S zr
	Granito Jardim do Ouro*	1880 ±3 <sup>5</sup>	Pb-Pb zr
	Granitos Palito e Rio Novo*	1883 ± 11, 1881 ±4 <sup>13</sup>	Pb-Pb zr
	Granito pórfiro*	–	–
	Granodiorito Fofuquinha*	–	–
	Suíte Intrusiva Parauari	1879 ±11 <sup>1</sup>	U-Pb T zr
		1883 ±2 <sup>7</sup>	Pb-Pb zr
	Riodacito Pacu*	1870 ±8 <sup>2</sup>	U-Pb S zr
	Tufos e arenito tufáceo*	1880 ±8, 1869 ±9 <sup>12</sup>	U-Pb S zr
	Pórfiros riodacíticos*	1888 ±7, 1879 ±24, 1873 ±3	U-Pb S zr
	Granitos pórfiros*	1888 ±3 <sup>18</sup>	Pb-Pb zr
	Traquito * Formação Moraes Almeida (riolitos)	1881 ±4 <sup>5</sup>	Pb-Pb zr
		1890 ±6, 1875 ±4 <sup>5</sup>	Pb-Pb zr
	Grupo Iri	1888 ±6 <sup>18</sup>	Pb-Pb zr
		1888 ±2 <sup>17</sup>	Pb-Pb zr
	Formações Salustiano e Aruri	1893 ±3, 1888 ±2 <sup>9</sup>	Pb-Pb zr
	Granito São Jorge Jovem*	1891 ±3 <sup>5</sup>	Pb-Pb zr
	Granodiorito São Jorge*	1907 ±9 <sup>8</sup>	U-Pb S zr
	Suíte Intrusiva Tropas	–	–
	Monzogranito Abacaxis*	1892 ±6 <sup>8</sup>	U-Pb S zr
	Tonalito Ouro Roxo	Pb 1894 ±3 <sup>8</sup>	U- S zr,  Ti
	Tonalito Tropas*	1894 ±3 <sup>8</sup>	U-Pb S ti
Tufo Uruá*	1897 ±3 <sup>8</sup>	U-Pb S zr	

			(conclusão)	
	Basalto Tropas*	1896 ±5 <sup>8</sup>	U-Pb S zr	
		1898 ±5 <sup>3</sup>	U-Pb S zr	
	Monzogranito B*	1971 ±14 <sup>12</sup>	U-Pb S zr	
	Granitos	1980 ±15, 1959 ±25, 1956 ±19	U-Pb S zr	
	Pórfiros graníticos*	1980 ±7, 1959 ±5 <sup>15</sup>	U-Pb S zr	
	Granito Tocantinzinho*	1982 ±5 <sup>14</sup>	Pb-Pb zr	
	Granito São Jorge Antigo*	1983 ±8 e 1981 ±2 <sup>5</sup>	Pb-Pb zr	
	Granitos pórfiros	1987 ±2 e 1982 ±3 <sup>16</sup>	Pb-Pb zr	
	Granito Tocantinzinho *	1989 ±1, 1979 ±4 <sup>19</sup>	U-Pb T zr	
	Suíte Intrusiva Creporizão		1968 ±7, 1963 ±6 <sup>3</sup>	U-Pb S zr
			1984 ±1, 1968 ±16 <sup>7</sup>	Pb-Pb zr
			1987 ±5 <sup>0</sup>	Pb-Pb zr
	Granito Tocantinzinho*	1993 ±12, 1985 ±11 <sup>19</sup>	U-Pb S zr	
		1996 ±13 <sup>0</sup>	Pb-Pb zr	
	Microgranodiorito*	1997 ±20 <sup>19</sup>	U-Pb S zr	
	Monzogranito Jamanxim*	1997 ±5 <sup>8</sup>	U-Pb S zr	
		1997 ±5 <sup>7</sup>	Pb-Pb zr	
	Xenólito de rocha máfica*	1956 ±33 <sup>21</sup>	U-Pb L zr	
	Metandesito Ouro Roxo*	1974 ±6 <sup>3</sup>	U-Pb S zr	
	Riolito I e II*	1975 ±5, 1970 ±20, 1967 ±7, 1966 ±6, 1966 ±22 <sup>15</sup>	U-Pb S zr	
	Riolito porfirítico*	1990 ±12 <sup>12</sup>	U-Pb S zr	
	Rochas subvulcânicas/Dacito*	1992 ±2 <sup>19</sup>	U-Pb L zr	
	Rochas subvulcânicas/Andesito*	1996 ±8 <sup>19</sup>	U-Pb S zr	
	Formação Vila Riozinho		2002 ±4 <sup>0</sup>	Pb-Pb zr
			2000 ±4, 1998 ±3 <sup>5</sup>	Pb-Pb zr
		Formação Comandante Arara	2020 ±2, 2012 ±2 <sup>0</sup>	Pb-Pb zr
	Monzogranito A*	2003 ±24 <sup>12</sup>	U-Pb S zr	
	Rochas encaixantes/Granodiorito*	2007±8, 2004 ±7 <sup>19</sup>	U-Pb L zr	
	Tonalitos do embasamento*	2023 ±30, 2123 ±86 <sup>15</sup>	U-Pb S zr	
	Associações de Embasamento	Complexo Cuiú-Cuiú	2016 ±3, 2014 ±6, 2010 ±4 <sup>0</sup>	Pb-Pb zr
2033 ±7, 2016 ±5, 2015 ±9, 2012 ±8, 2005 ±7 <sup>3</sup>			U-Pb S zr	
2011 ±23 <sup>1</sup>			U-Pb T zr	
Grupo Jacareacanga		2189±4, 2136 ±2, 2034 ±6, 2008 ±6, 1972 ±2 <sup>2</sup>	Pb-Pb zr	
		2125, 2106, 2098, 2875 <sup>1</sup>	U-Pb T zr	

Abreviaturas: S. SHRIMP; T. ID-TIMS; L. LA-ICP-MS; rt. rocha total; bd. badeleíta; ti. titanita; zr. zircão; zrd. zircão detrítico; \*denominação usada exclusivamente pelos autores. Referências: 0 – Vasquez *et al.* (2017); 1 – Santos *et al.* (2000); 2 - Almeida *et al.* 2001; 3 – Santos *et al.* (2001); 4 – Sato & Tassinari (1997); 5 – Lamarão *et al.* (2002); 6 – Lamarão *et al.* (2005); 7 – Vasquez *et al.* (2000); 8 – Santos *et al.* (2004); 9 – Vasquez *et al.* (1999); 10 - Santos *et al.* (2002); 11 - Santos *et al.* (1975); 12- Aguja-Bocanegra (2013); 13 – Santos *et al.* (2013); 14 – Villas *et al.* (2013); 15 - Tokashiki *et al.* (2015); 16 - Lamarão *et al.* (2008); 17 – Dall’Agnol *et al.* (1999); 18 - Moura *et al.* (1999); 19 – Borgo *et al.* (2017); 20 - Tassinari (1996); 21 - Souza (2009); 22 - Echeverri-Misas (2015).

### 2.3 Coberturas Sedimentares Paleoproterozoicas

A cobertura sedimentar mais antiga encontrada na província é a Formação Castelo dos Sonhos localizada na parte sudeste, no limite com o Domínio Iriri-Xingu. Trata-se de quartzos arenitos, conglomerados quartzosos e arcóseos silicificados, com indícios de milonitização incipiente e metamorfismo termal. A Formação ainda abriga mineralização aurífera tipo paleoplacer (Yokoi *et al.* 2001).

A Formação Novo Progresso ocorre na forma de arenitos arcoseanos e líticos, com níveis conglomeráticos, intercalados com argilitos e siltitos tufáceos. Estas rochas ocorrem frequentemente associadas com as rochas vulcânicas e piroclásticas da Formação Vila Riozinho, sugerindo que sua gênese estaria ligada a um retrabalhamento sedimentar posterior à erupção, porém a área ainda carece de dados mais densos para uma interpretação mais precisa (Ferreira *et al.* 2004; Vasquez *et al.* 2017).

A Formação Buiçu está presente no centro-oeste e nordeste da província; são arcóseos líticos e arenitos ortoquartzíticos, com subordinados conglomerados polimíticos, siltitos e argilitos. Santos *et al.* (2001) atribuíram uma idade máxima de sedimentação > 1879 Ma (ver Tabela 3) para a Formação, porém diques e soleiras do Diabásio Crepori de 1780 Ma (ver Tabela 3) cortam estas rochas, ou seja, os sedimentos provavelmente foram depositados entre 1879 e 1780 Ma (Vasquez *et al.* 2017).

#### 2.2.4 Magmatismo Máfico Proterozoico e Fanerozoico

Entre o Estateriano e o Jurássico, ocorrem corpos máficos na PMT, como o Diabásio Crepori que intrudiu as coberturas sedimentares da Formação Buiçu na bacia do rio Crepori. São diabásios, olivina diabásios e microgabros de filiação toleítica continental. No oeste da província, diques de diabásio denominados Diabásio Cururu, com orientação NNE, cortam rochas devonianas da Bacia do Alto Tapajós. Esses corpos representam o principal magmatismo toleítico continental jurássico (Magmatismo Penatecaua) que atuou na Bacia do Amazonas (Vasquez *et al.* 2017).

### 2.3 GEOLOGIA DA REGIÃO DE VILA RIOZINHO

A região de Vila Riozinho está geograficamente situada na porção central da PMT, a cerca de 300 km ao sul da cidade de Itaituba, e abrange as localidades de Jardim do Ouro, Moraes Almeida e Vila Riozinho. A principal via de acesso rodoviário se dá pela rodovia Cuiabá-Santarém (BR-163).

A Formação Vila Riozinho é composta por andesitos basálticos, traquiandesitos basálticos, traquitos, riolitos, tufos e brechas. É a unidade mais antiga encontrado na região da

Vila Riozinho. Datações Pb-Pb em zircão em rochas traquíticas desta formação indicaram idades de cristalização de  $2000\pm 4$  e  $1998\pm 3$  Ma, sendo a rocha encaixante do Granito São Jorge Antigo (Lamarão *et al.* 2002, 2005).

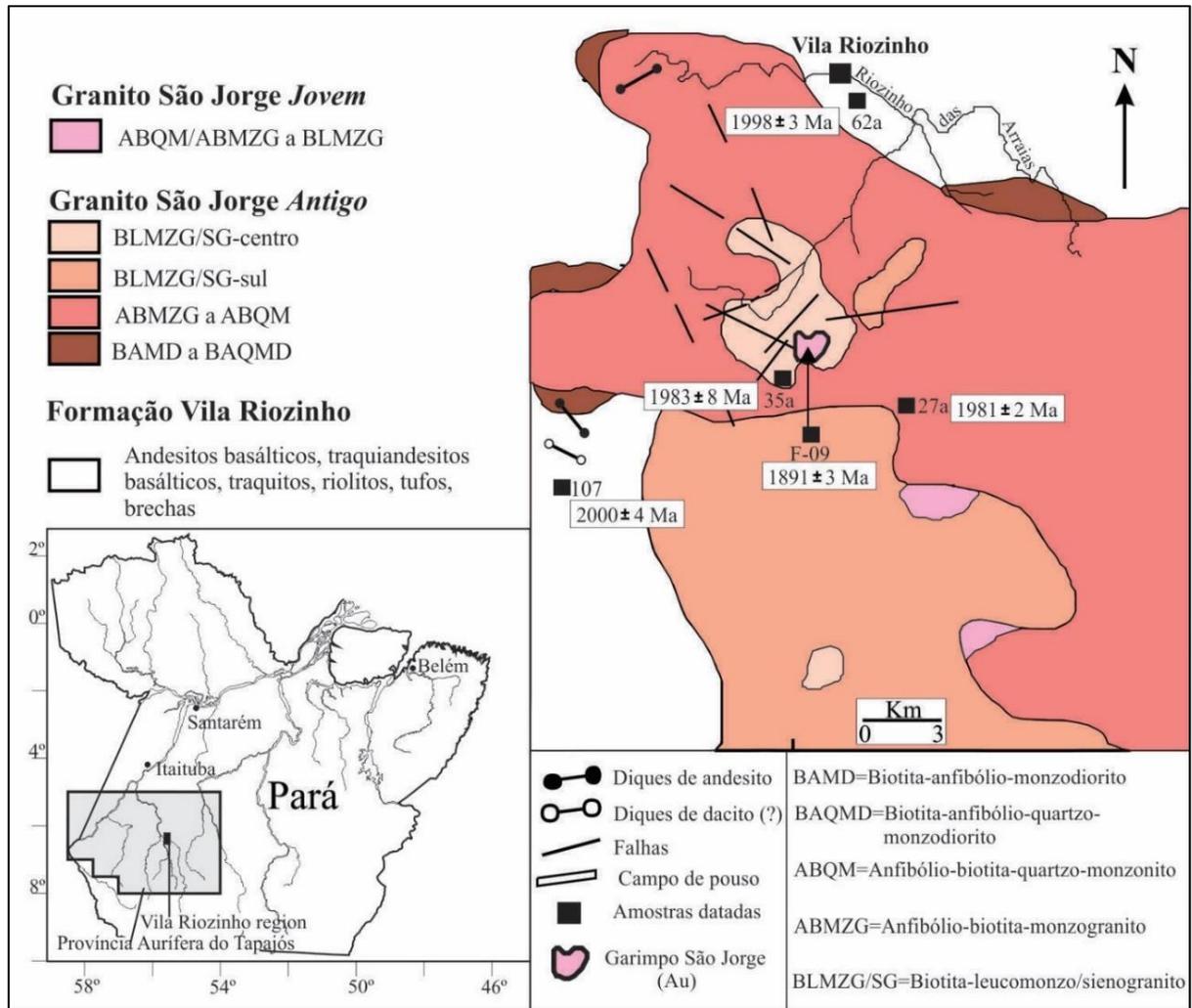
Os granitos São Jorge Antigo (GSJA) e São Jorge Jovem (GSJJ) (Figura 3), apesar de apresentarem características petrográficas e texturais similares, exibem idades e assinaturas geoquímicas contrastantes (Lamarão *et al.* 2002).

### 2.3.1 Granito São Jorge Antigo

O Granito São Jorge Antigo (GSJA; Figura 3) é um batólito irregular, ocorrendo de forma intrusiva na Formação Vila Riozinho. É um corpo composicionalmente zonado, constituído por rochas de composição dioríticas ( fácies menos evoluída), monzograníticas (fácies intermediária e dominante) e leucograníticas (fácies mais evoluída) na porção central. Datações Pb-Pb em zircão em monzogranitos forneceram idade de cristalização de  $1981\pm 2$  e  $1983\pm 8$  Ma. O GSJA possui afinidades geoquímicas com granitos tipo I, assinatura metaluminosa a levemente peraluminosa e caráter oxidado, características de formação a partir de um ambiente de arco magmático (Lamarão *et al.* 2002, 2008).

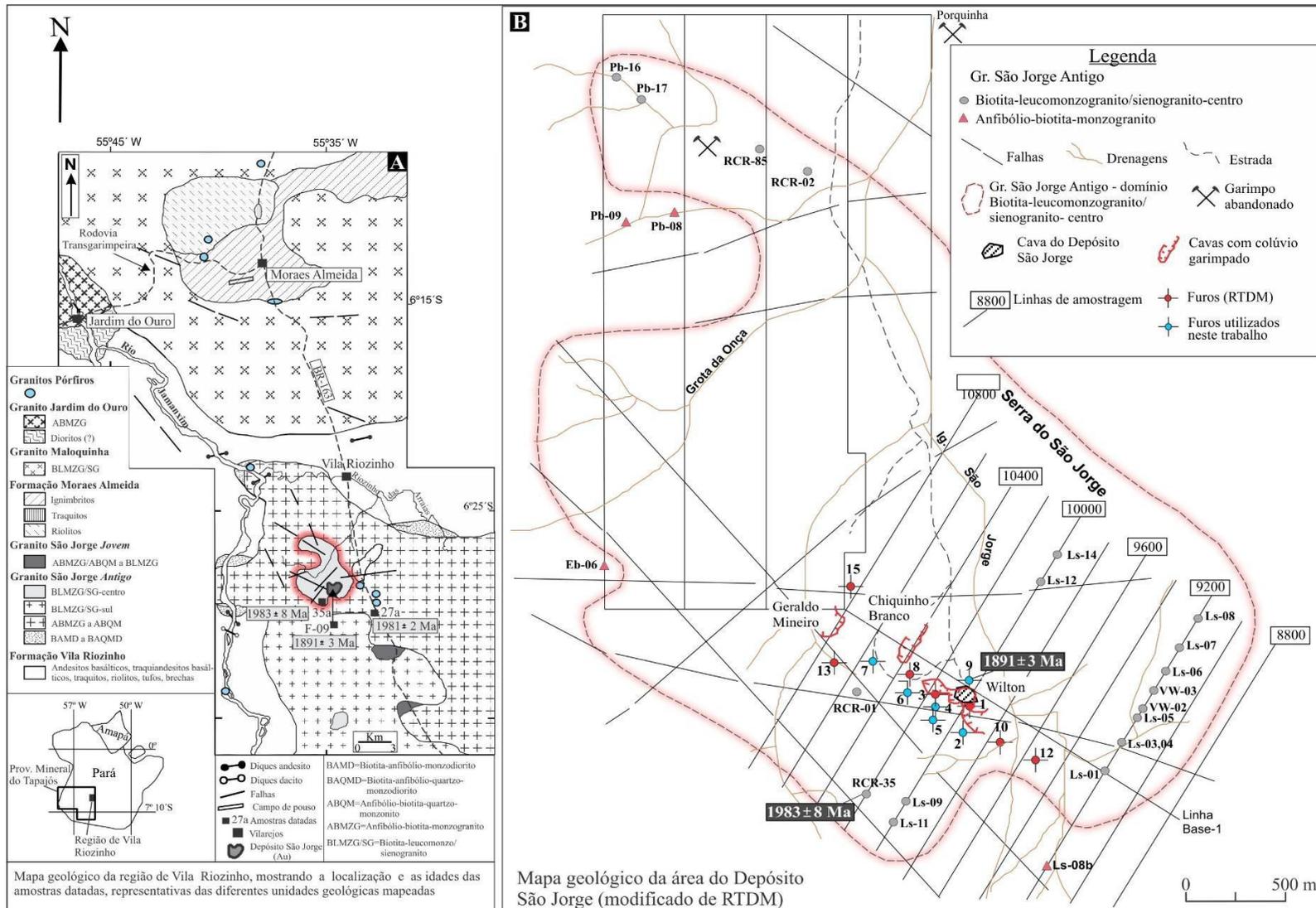
### 2.3.2 Granito São Jorge Jovem

O Granito São Jorge Jovem (GSJJ; Figuras 3 e 4) é o hospedeiro da mineralização aurífera e foi identificado na área do depósito São Jorge (Figura 4B) a partir de testemunhos de sondagem. O GSJJ é composto por rochas de composição monzograníticas e leucomonzograníticas de filiação cálcio-alcálica de alto-K. Datações Pb-Pb em zircão no leucomonzogranito revelou uma idade cristalização de  $1891\pm 3$  Ma, mostrando um *gap* de aproximadamente 100 Ma entre os dois corpos graníticos (Lamarão *et al.* 2002, 2005, 2008).



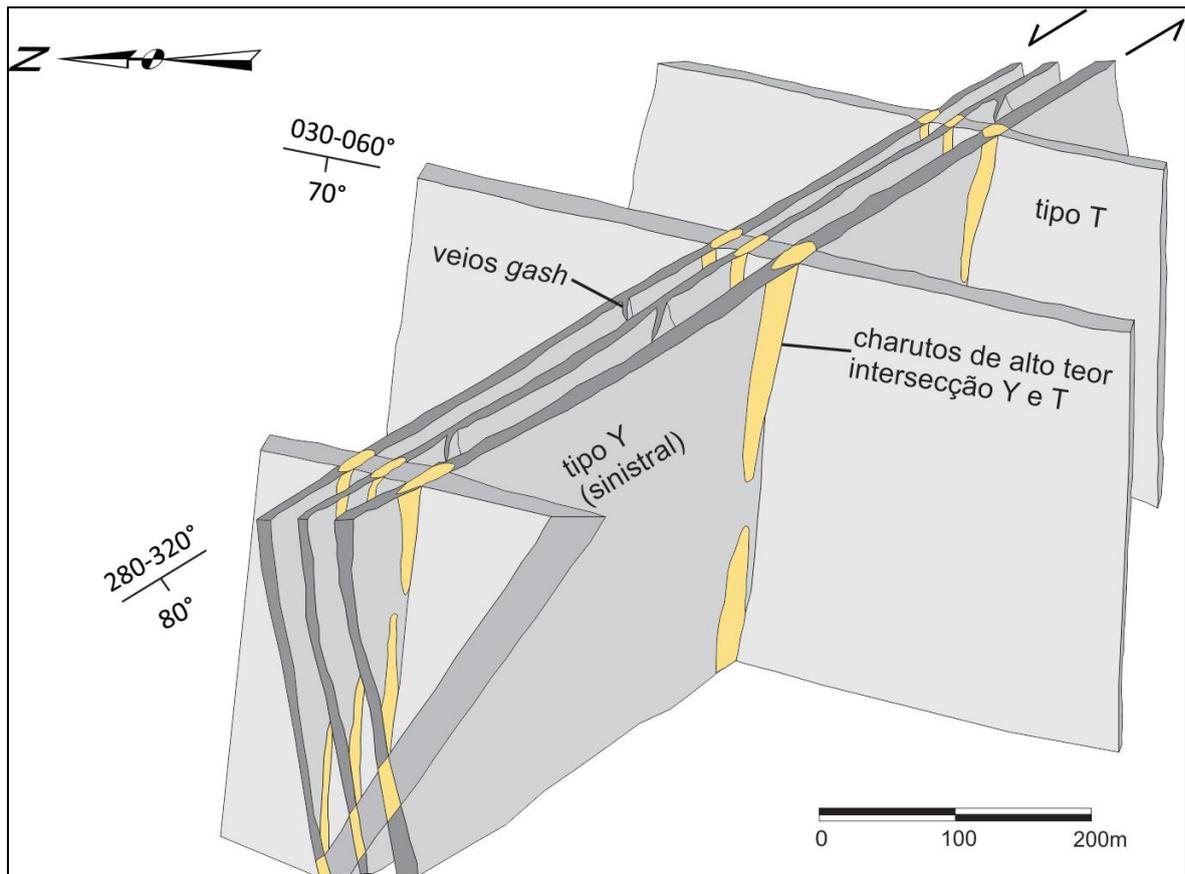
**Figura 3.** Mapa geológico do plúton São Jorge com as idades obtidas para suas diferentes fácies e rochas vulcânicas encaixantes (Fm. Vila Riozinho); destaque para o depósito São Jorge. Modificado de Lamarão *et al.* (2008).

Ambos os corpos são cortados por diques de microgranitos e quartzo latito, e a mineralização acompanha zonas de falhas transcorrentes sinistras que circundam a borda sul do GSSJ (Borges 2010). O GSSJ é comumente encontrado cataclásado e alterado hidrotermalmente e seus veios e vênulas de quartzo se concentram próximos ao contato com o GSJA encaixante. Estes veios têm espessura centimétrica que em certas regiões evoluem para dimensões superiores a 20 m de largura e atingem até 150 m de profundidade (Borges 2010).



**Figura 4.** (A) Mapa de localização da região de Vila Riozinho, PMT, com destaque para o dep. de ouro São Jorge. (B) Detalhe da área do depósito com a localização dos furos de sondagem estudados (em azul). Modificado de Borges *et al.* (2009).

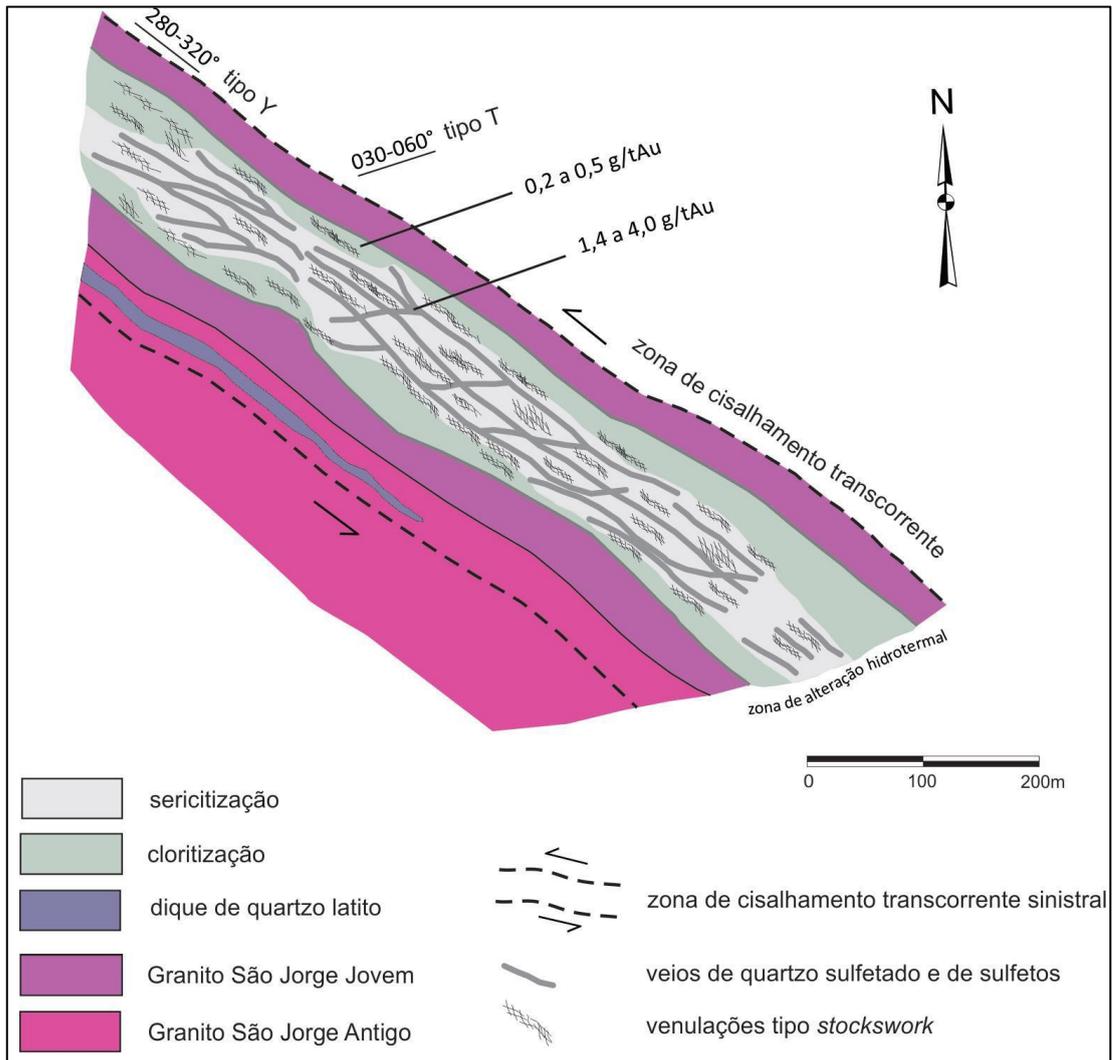
Com base em dados de sondagem e no modelamento das áreas mineralizadas realizados pela Talon Metals, as maiores concentrações de ouro ocorrem na intersecção de duas direções principais: (a) NW-SE (N40-80°W, 80°SW) do cisalhamento principal (tipo Y) para os veios mais possantes, e (b) NE-SW (N30-60°E, 70°NW) para veios menores que correspondem a fraturas de extensão (tipo T) e veios *gash* (Figura5). Esta trama forma corpos do tipo “charuto” de alto teor (Borges 2010).



**Figura 5.** Bloco diagrama do controle estrutural da mineralização no depósito São Jorge. A intersecção dos veios principais (tipo Y, sinistral) e extensionais (tipo T, *gash*) formam “charutos” de alto teor de sulfetos e ouro. (modificado de Borges 2010, que adaptou do modelo da Talon Metals)(Vasquez *et al.* 2017).

A associação magmática do GSJJ é vista nas zonas mais distais do halo hidrotermal, onde a Mg-hornblenda teria se formado a baixas pressões (< 1 kbar) e a altas  $fO_2$ , como evidenciado pelos expressivos conteúdos modais de magnetita. A zona de alteração hidrotermal do depósito pode alcançar 100 m de espessura. A alteração sericítica está concentrada na porção central desta zona, enquanto a alteração clorítica ocorre nas partes distais (Figura 6). A mineralização ocorre disseminada no granito hidrotermalizado e em vênulas tipo *stockwork*. Os teores de ouro são relativamente mais baixos (0,2 a 0,5 g/t) quando comparados às concentrações dos veios de quartzo sulfetados e de sulfetos maciços, onde variam entre 1,4 e 4,0 g/t (Borges

et al. 2009; Borges 2010; Vasquez et al. 2017).



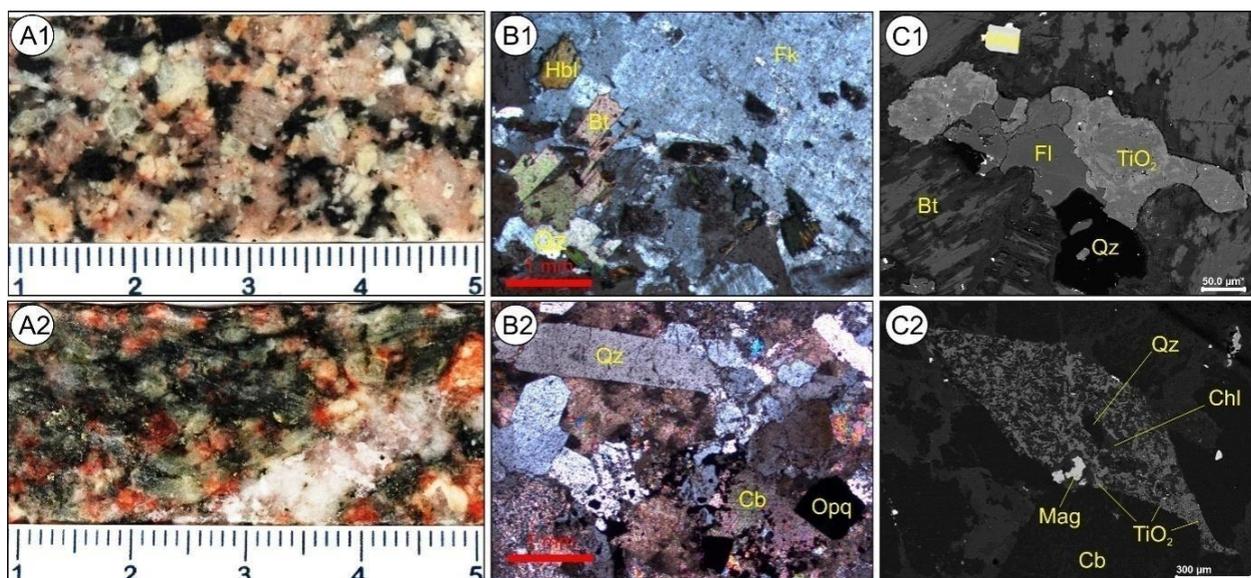
**Figura 6.** Esquema da zona de alteração hidrotermal e distribuição da mineralização de ouro no depósito São Jorge. A mineralização de alto teor ocorre nos veios de quartzo sulfetados e de sulfeto maciço, enquanto o ouro disseminado ocorre nas zonas de alteração sericítica e clorítica. (modificado de Borges 2010, que adaptou do modelo da Talon Metals).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 PETROGRAFIA E TEXTURA DAS ROCHAS HOSPEDEIRAS

Os estudos petrográficos foram realizados em 5 furos de sondagens do depósito São Jorge (ver Figura 4B). A rocha hospedeira da mineralização é predominantemente um hornblenda-biotita monzogranito. A zona não-mineralizada é constituída por feldspato potássico subédrico, plagioclásio subédrico (andesina sódica a oligoclásio) zonado e pouco alterado, quartzo anédrico, biotita pouco cloritizada contendo inclusões de  $\text{TiO}_2$  e quartzo, anfibólio subédrico e titanita euédrica bem preservada. A magnetita é o mineral opaco predominante. Os polimorfos  $\text{TiO}_2$  são representados por finos (10-100 $\mu\text{m}$ ) cristais anédricos inclusos ou no entorno de biotitas (Figura 7-C1).

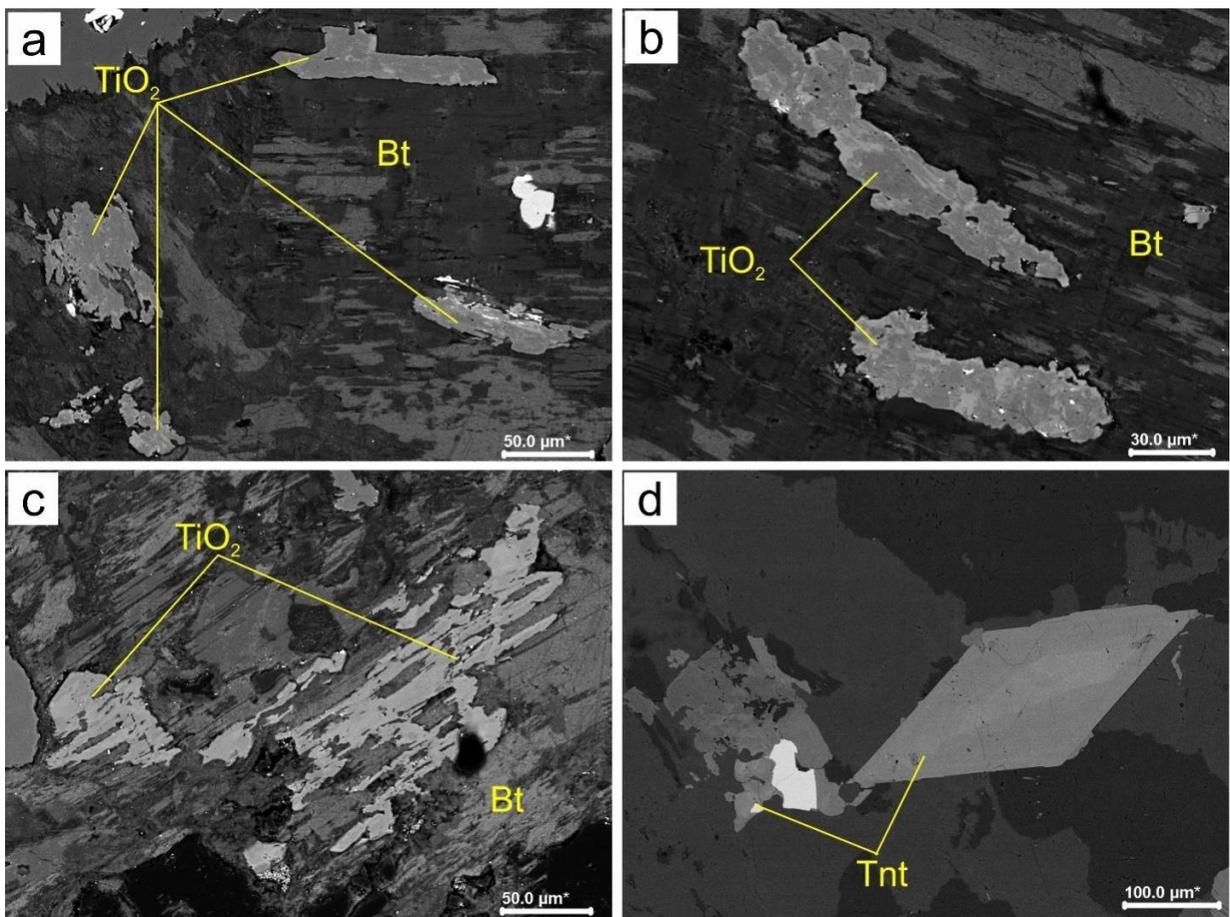
As amostras da zona mineralizada apresentam alteração hidrotermal variada, com rochas no estágio de alteração propilítica e sericítica. A Hornblenda e a biotita são substituídas por carbonatos e clorita, enquanto o plagioclásio é substituído totalmente por mica branca e carbonatos. O quartzo está presente como veios que seccionam a amostra, ou como cristais euédricos variando entre 100 $\mu\text{m}$  a 3mm. A magnetita e ilmenita estão presentes nas fases menos alteradas, enquanto nos estágios fortemente hidrotermalizados predominam sulfetos, principalmente pirita. Os polimorfos de  $\text{TiO}_2$  formam agregados aciculares ou com textura esquelética, substituindo predominantemente a titanita (Figura 7- C2).



**Figura 7.** Zona estéril (ZE) e mineralizada (ZM) do depósito São Jorge. (A1 e A2) fotografia dos testemunhos de sondagem; a ZE (A1) apresenta textura ígnea inequigranular, enquanto a ZM (A2) exibe cor esverdeada com pontos amarelados, feldspatos alterados e veios de quartzo; (B1) ZE com textura inequigranular hipidiomórfica com fenocristais de k-feldspato, biotitas e hornblendas preservadas; (B2) ZM hidrotermalizada com quartzos hidrotermais bem desenvolvidos, minerais carbonáticos e sericitizados; (C1) imagem de elétrons retroespalhados (ERE) exibindo cristais de  $\text{TiO}_2$  em contato com biotita, fluorita e quartzo; (C2) imagem de ERE mostrando quartzo, clorita e  $\text{TiO}_2$  em pseudomorfo de titanita (textura esquelética).

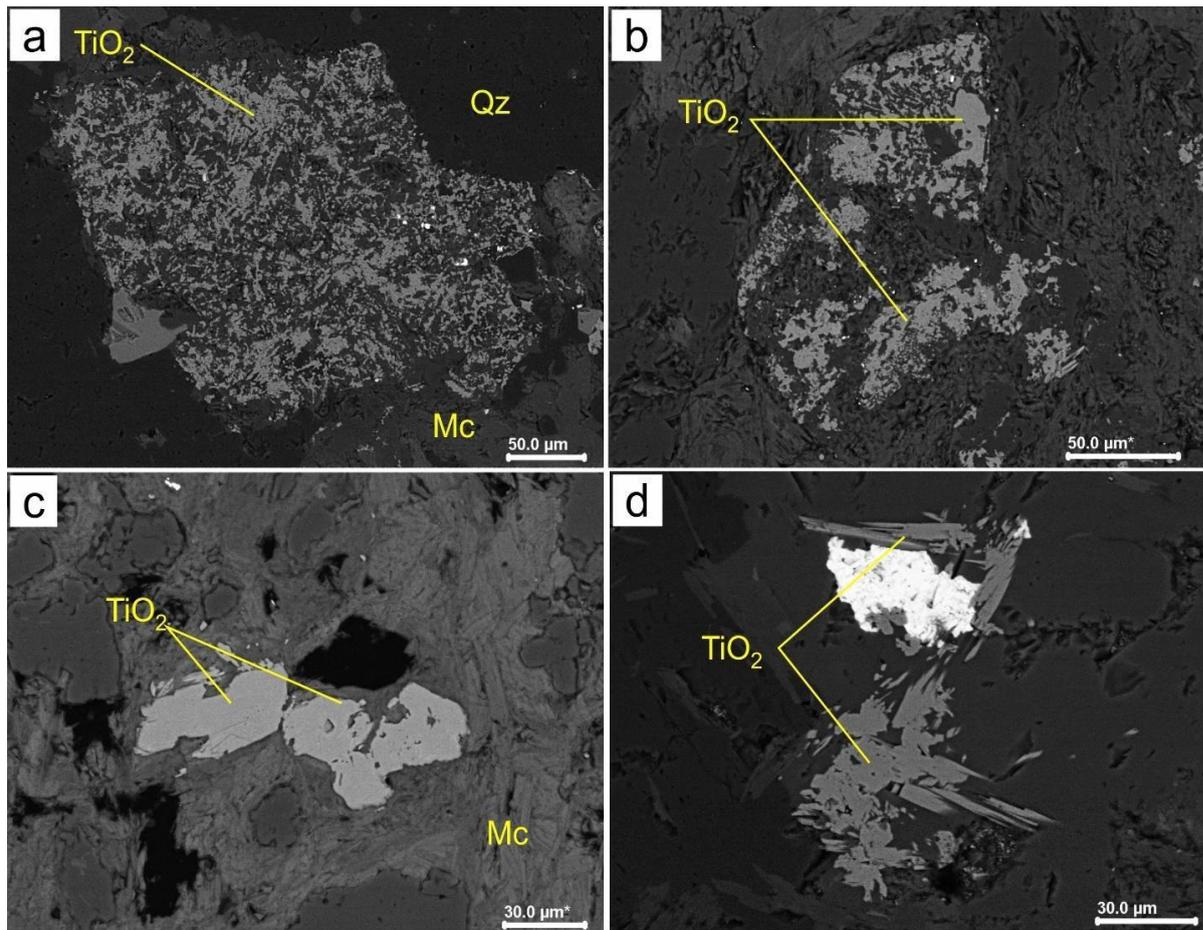
### 3.2 MORFOLOGIA DOS POLIMORFOS DE $\text{TiO}_2$

Os polimorfos de  $\text{TiO}_2$  pertencentes às zonas estéreis (ZE) apresentam-se como finos agregados halotriomórficos, com aspecto corroído e dimensões variando entre 10-100 $\mu\text{m}$ . Esses cristais estão frequentemente inclusos, alterando ou no entorno de cristais de biotitas (Figura 8a, b, c). Nessas zonas, o principal mineral de titânio é representado pela titanita que forma cristais idiomórficos bem desenvolvidos e preservados, com dimensões variando entre 100-500 $\mu\text{m}$  (Figura 8d).



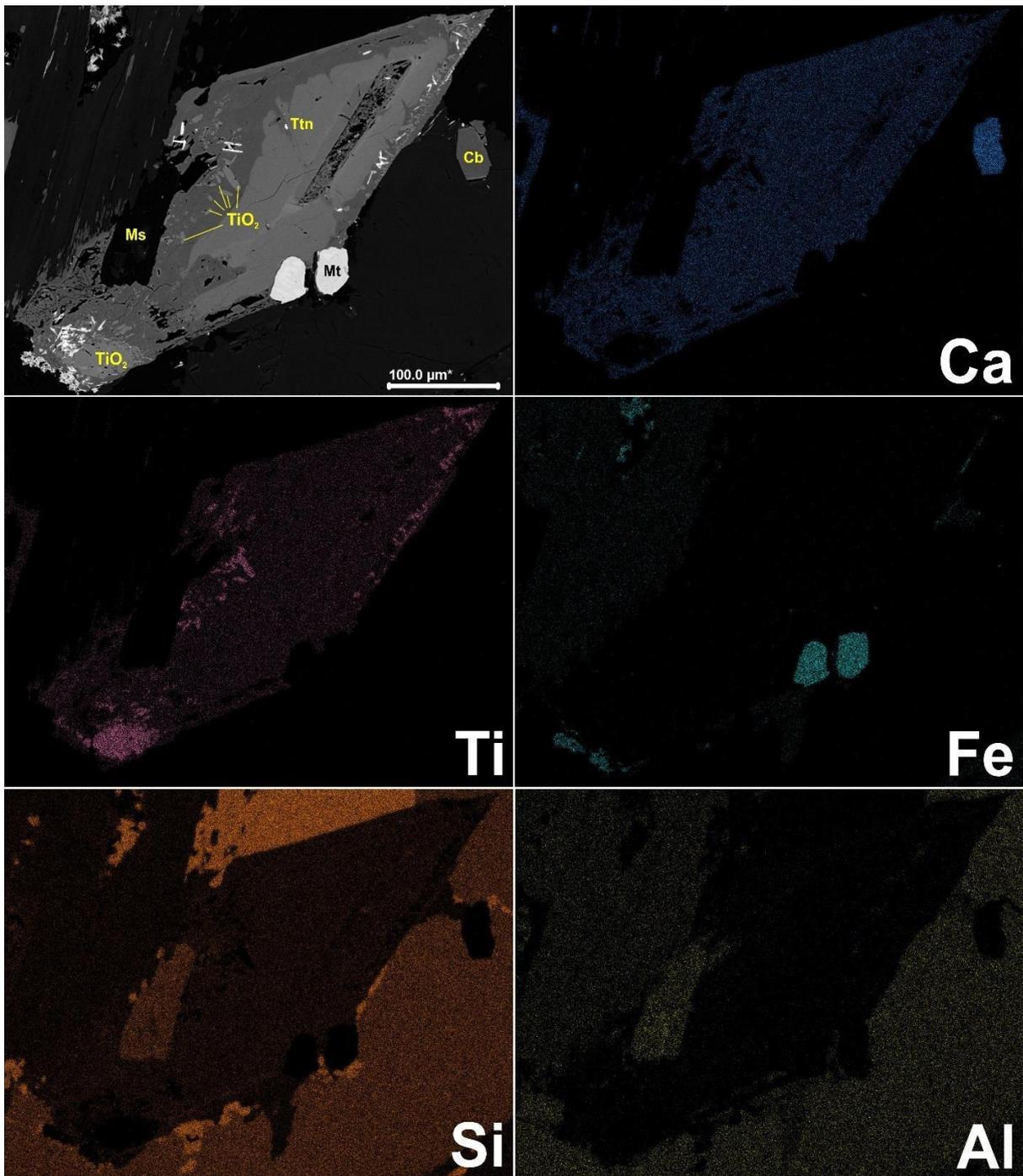
**Figura 8.** Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) exemplificando a morfologia dos rutilos e titanitas presentes nas zonas não mineralizadas ou estéreis (ZE). (a), (b) e (c) mostrando rutilos halotriomórficos em contato ou alterando biotitas; e (d) titanita idiomórfica e hipidiomórfica sem alterações aparentes.

Os polimorfos de  $\text{TiO}_2$  pertencentes às zonas mineralizadas (ZM) formam cristais de dimensões que variam consideravelmente (5-500 $\mu\text{m}$ ). Os cristais apresentam-se de várias formas: (1) como produto da substituição total ou parcial de titanitas, exibindo frequentemente textura esquelética em contato com cristais de quartzo idiomórfico e mica branca (Figura 9a, b); (2) cristais hipidiomórficos inclusos em mica branca ou em contato com quartzos idiomórficos (Figura 9c) e; (3) cristais aciculares geralmente inclusos em quartzos idiomórficos (Figura 9d).



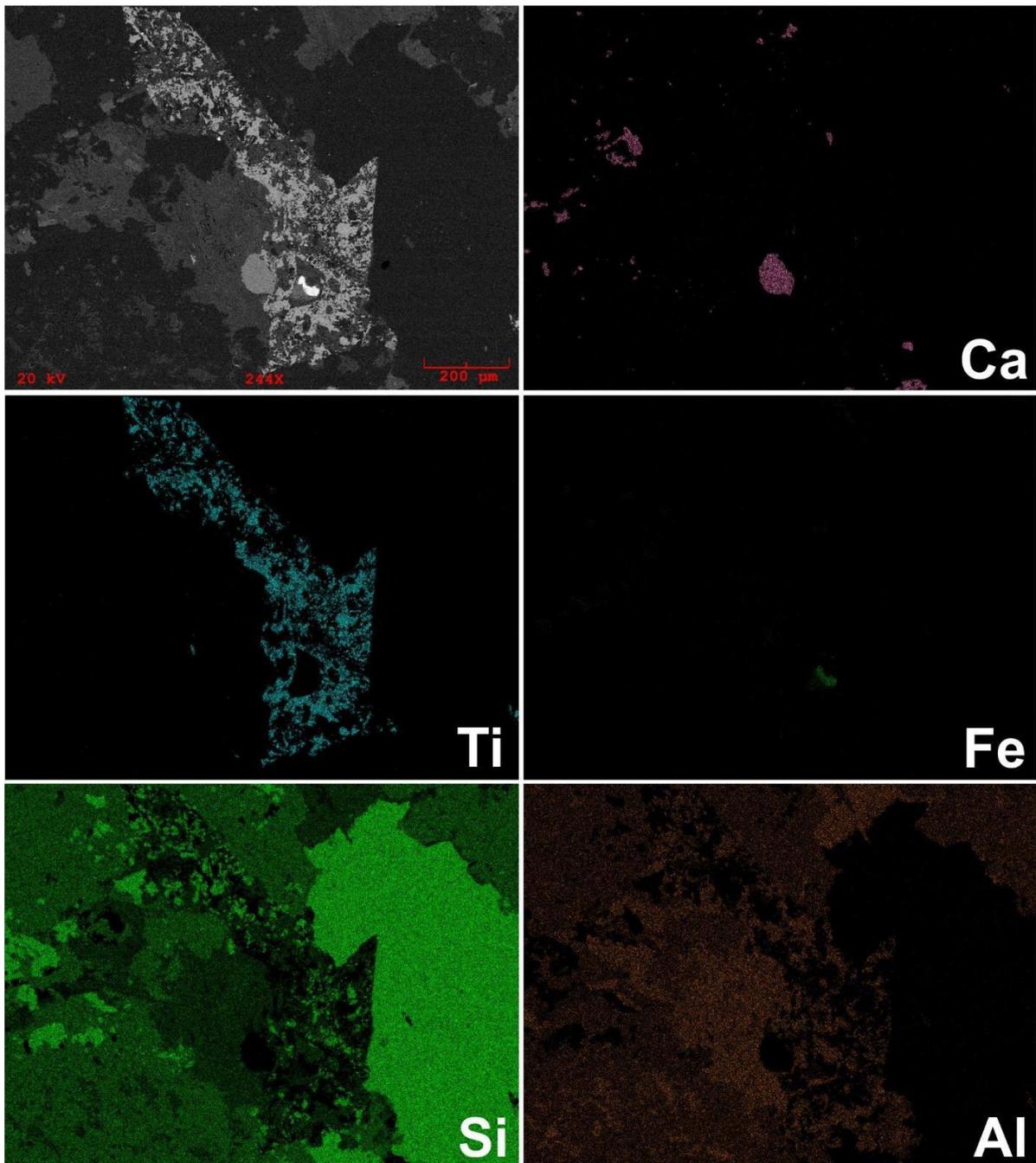
**Figura 9.** Imagens de ERE exemplificando a morfologia dos rutilos presentes na zona mineralizada (ZM). (a) e (b) rutilos xenomórficos provenientes da alteração de titanitas; (c) rutilos hipidiomórficos em contato com mica branca (Mc) e (d) rutilos aciculares incluídos em cristais e quartzo.

Mesmo em amostras onde a alteração hidrotermal é incipiente, foi possível observar que a alteração parcial da titanita para polimorfos de  $\text{TiO}_2$  está presente, sobretudo nas bordas dos cristais. A Figura 10 consiste em um mapa de elementos, onde um cristal de titanita foi mapeado para se obter a distribuição espacial de Ca, Ti, Si, Fe e Al. Neste mapa, é possível observar que as bordas do cristal estão mais enriquecidas em Ti (lilás mais intenso), sugerindo aí a formação de polimorfos de  $\text{TiO}_2$ . Por outro lado, Ca (em azul) e Si (em marrom), principais componentes da titanita, se mostram homogêneos e permanecem sem variações na intensidade das cores, sugerindo pouca ou nenhuma alteração nessas regiões do cristal.



**Figura 10.** Imagem de elétrons retroespalhados (canto superior esquerdo) e mapa de elementos (Ca, Ti, Fe, Si e Al) obtidos com MEV em titanita parcialmente alterada. O titânio brilha em maior intensidade nas bordas do mineral (lilás mais intenso), indicando a presença de um polimorfo de  $\text{TiO}_2$ , mesma região onde Ca (azul claro) e Si (laranja) não estão presentes.

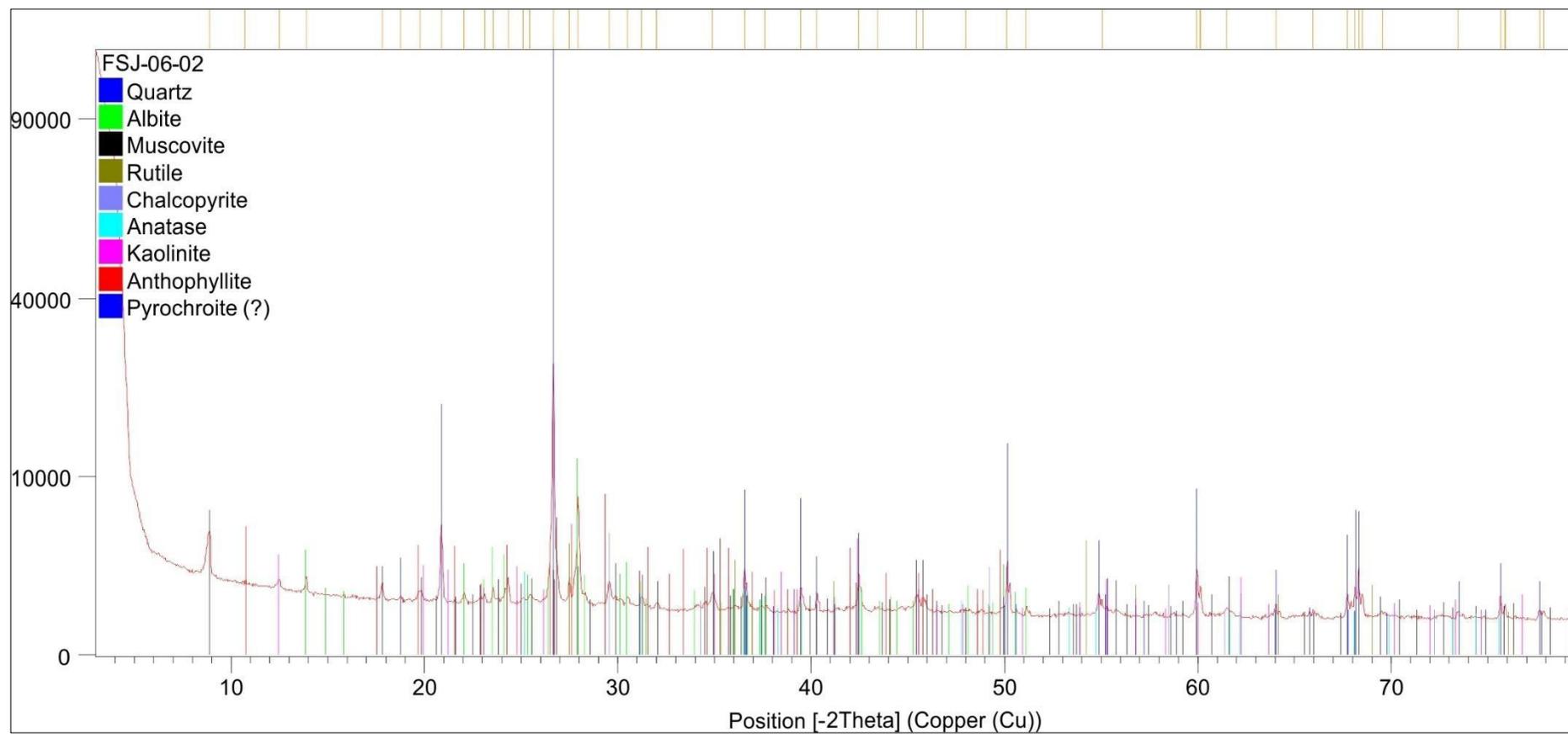
Por outro lado, nas áreas do depósito onde a atividade hidrotermal foi mais intensa, a alteração dos cristais de titanita para polimorfos de  $\text{TiO}_2$  pode ser melhor evidenciada. Na Figura 11, o mapa de elementos do um cristal de titanita mostra maior concentração de Ti (azul claro) em relação aos outros principais componentes (Ca e Si), indicando sua transformação quase completa para  $\text{TiO}_2$ .



**Figura 11.** Imagem de elétrons retroespalhados (canto superior esquerdo) e mapa de elementos (Ca, Ti, Fe, Si e Al) obtidos em MEV em titanita intensamente alterada. O titânio é o elemento dominante no cristal (azul claro intenso), indicando a presença de um polimorfo de  $\text{TiO}_2$ , mesma região onde Ca (lilás) e Si (verde claro) não estão presentes ou ocorrem de maneira subordinada.

### 3.3 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

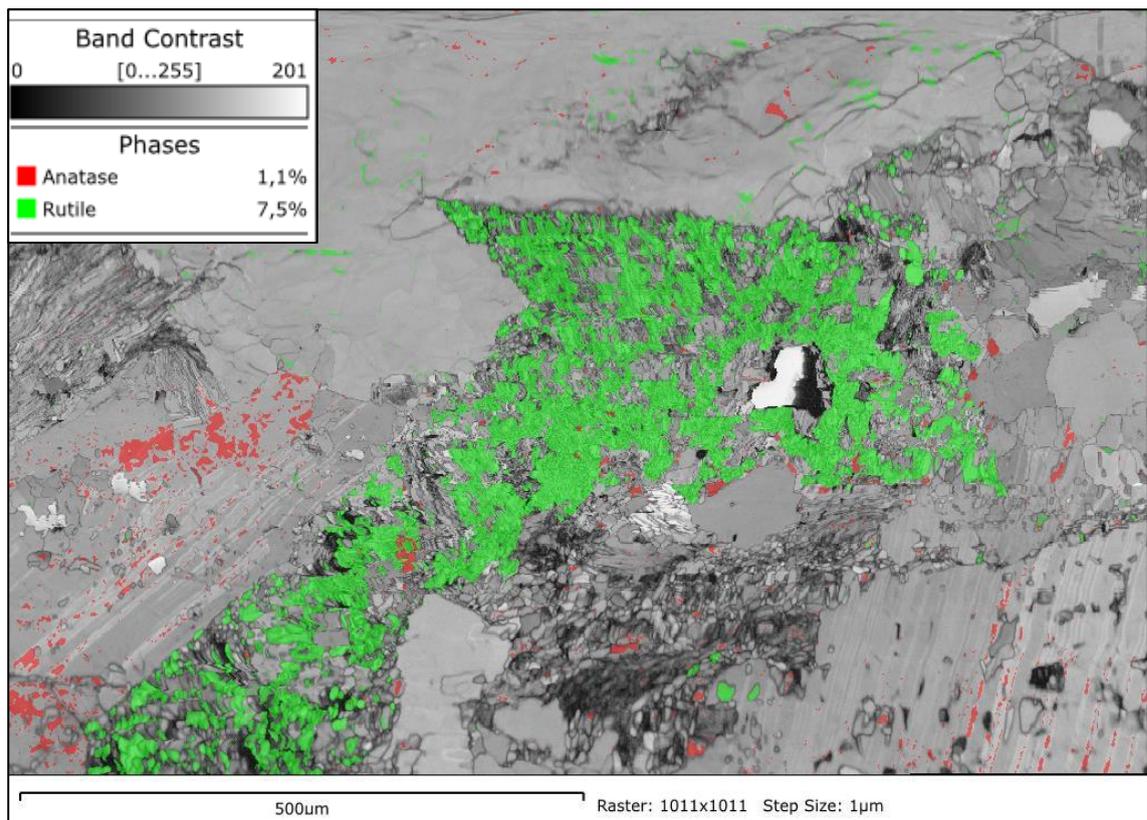
Fragmentos de testemunhos de sondagem da zona mineralizada foram pulverizados e submetidos a análises por difração de raios-X (DRX). O resultado (Figura 12) indicou o rutilo como representante principal entre os polimorfos de  $\text{TiO}_2$ . Entretanto, os dados indicaram a possibilidade da presença de anatásio na rocha. Neste caso, foi necessário confirmar a presença deste polimorfo e de suas supostas características texturais com a utilização de análises de MEV- EBSD.



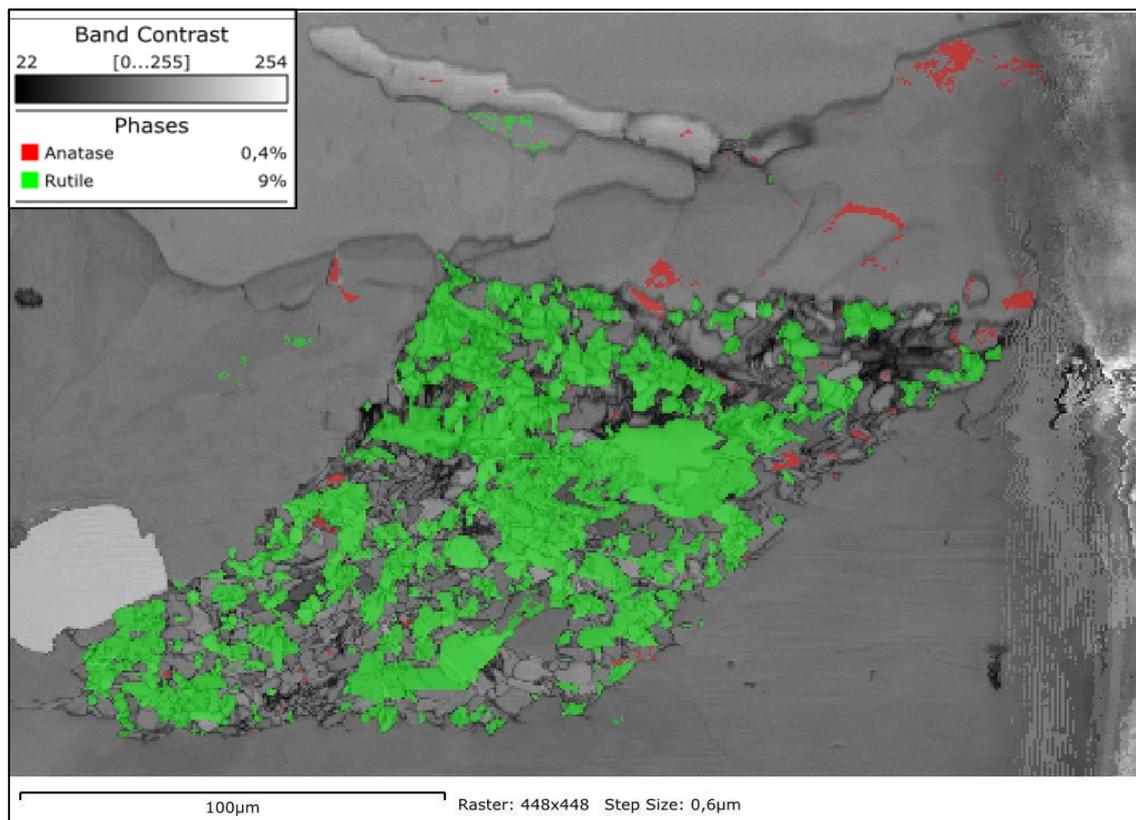
**Figura 12.** Análises por difração de raios-X (DRX) que indicou possível coexistência entre os polimorfos rutilo e anatásio no Granito São Jorge Jovem.

### 3.4 DIFRAÇÃO DE ELETRONS RETROESPALHADOS - MEV-EBSD

Lâminas polidas selecionadas (ver Tabela 1) foram analisadas também por difração de elétrons retroespalhados (EBSD). Os resultados indicaram o rutilo (em verde) como o polimorfo de  $\text{TiO}_2$  predominante em todas elas (Figuras 13 e 14). A imagem obtida por EBSD (*Band Contrast + Phase Map*) mostrou ocorrências localizadas de anatásio (em vermelho). Porém, as supostas ocorrências indicadas na imagem não obedecem a morfologias previamente observadas em imagens de ERE.



**Figura 13.** Imagem EBSD (Band Contrast + Phase Map) mostrando os polimorfos do rutilo presente na amostra. É possível observar que o  $\text{TiO}_2$  que substituiu a titanita é predominantemente rutilo.



**Figura 14.** Imagem EBSD (Band Contrast + Phase Map) mostrando que o rutilo é o polimorfo de  $\text{TiO}_2$  dominante alterando o cristal de titanita.

### 3.5 MICROANÁLISES POR DISPERSÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA – WDS

Foram realizadas 194 análises de microsonda eletrônica (WDS) em cristais individuais e em agregados de cristais de rutilo. Os resultados indicaram que os cristais de rutilo presentes na zona mineralizada (ZM) e não mineralizada (ZE) do GSJJ possuem variações composicionais significativas.

Os rutilos encontrados na zona estéril (ZE) são enriquecidos em Nb (> 5.000 ppm) em relação aos cristais da zona mineralizada (ZM), com concentrações de Nb predominantemente < 3.000 ppm (Figura 14). Alguns cristais analisados da ZE apresentaram enriquecimento em Fe, porém sempre acompanhados com teores elevados de Nb. Os cristais de rutilo presentes na ZM mostram um *trend* de enriquecimento em Al (1000 – 4000 ppm), V (3000 – 4500 ppm) e Zr (250 – 2500 ppm) e com menor frequência, Sb (10 – 1000 ppm).

A Tabela 4 apresenta as principais composições dos cristais de rutilo analisados.

Tabela 4- Análises representativas em microsonda eletrônica de cristais de rutilo estudados

(continua)

Amostra: FSJJ-02-25					
Zona: Mineralizada					
Classificação	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo
SiO <sub>2</sub>	0,857	0,503	0,677	0,177	0,408
Si	0,400	0,240	0,320	0,080	0,190
TiO <sub>2</sub>	98,362	98,112	98,568	98,761	99,964
Ti	58,970	58,820	59,090	59,210	59,930
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,306	0,127	0,175	0,027	0,076
Al	0,160	0,070	0,090	0,010	0,040
CaO	0,00	0,181	0,071	0,102	0,039
WO <sub>3</sub>	0,263	0,123	0,166	0,00	0,011
W	0,209	0,098	0,132	0,000	0,009
SnO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FeO	0,829	0,332	0,802	0,484	0,394
Fe	0,644	0,258	0,623	0,376	0,306
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,010	0,001	0,117	0,008	0,005
Cr	0,007	0,001	0,080	0,005	0,003
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,548	0,473	0,500	0,523	0,489
V	0,307	0,265	0,280	0,293	0,274
MnO	0,005	0,017	0,017	0,007	0,006
Mn	0,004	0,013	0,013	0,005	0,005
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,107	0,201	0,296	0,296	0,343
Nb	0,075	0,141	0,207	0,207	0,240
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ta	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ZrO <sub>2</sub>	0,040	0,072	0,053	0,140	0,138
Zr	0,030	0,053	0,039	0,104	0,102
Total	101,327	100,142	101,442	100,525	101,873

(continuação)

FSJJ-02-39					
Zona: Mineralizada					
Classificação	Rutilo - 1	Rutilo - 2	Rutilo - 3	Rutilo - 4	Rutilo - 5
SiO <sub>2</sub>	0,055	0,004	0,439	0,458	0,128
Si	0,030	0,00	0,210	0,210	0,060
TiO <sub>2</sub>	99,403	99,435	98,147	99,895	98,014
Ti	59,590	59,610	58,840	59,890	58,760
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,008	0,002	0,092	0,045	0,023
Al	0,00	0,00	0,05	0,02	0,01
CaO	0,607	0,188	0,082	0,082	0,263
WO <sub>3</sub>	0,117	0,08	1,619	0,54	0,033
W	0,093	0,063	1,284	0,428	0,026
SnO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FeO	2,100	0,570	1,386	0,895	0,648
Fe	1,632	0,443	1,077	0,696	0,504
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,027	0,03	0,11	0,085	0,045
Cr	0,018	0,021	0,075	0,058	0,031
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,618	0,627	0,457	0,47	0,487
V	0,346	0,351	0,256	0,263	0,273
MnO	0,019	0,006	0,020	0,010	0,020
Mn	0,015	0,005	0,015	0,008	0,015
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,114	0,089	0,017	0,015	0,00
Sb	0,095	0,074	0,014	0,013	0,000
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,396	0,301	0,339	0,301	0,181
Nb	0,277	0,210	0,237	0,210	0,127
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ta	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ZrO <sub>2</sub>	0,034	0,04	0,050	0,035	0,143
Zr	0,025	0,030	0,037	0,026	0,106
Total	103,498	101,372	102,758	102,831	99,985

(continuação)

Amostra: FSJJ-02-40					
Zona: Mineralizada					
Classificação	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo
SiO <sub>2</sub>	0,801	0,501	0,858	0,679	0,844
Si	0,370	0,230	0,400	0,320	0,390
TiO <sub>2</sub>	98,657	98,976	98,600	98,319	98,657
Ti	59,140	59,330	59,110	58,940	59,140
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,239	0,085	0,375	0,106	0,293
Al	0,130	0,040	0,200	0,060	0,160
CaO	0,020	0,018	0,00	0,045	0,009
WO <sub>3</sub>	0,121	0,038	0,187	0,031	0,131
W	0,096	0,030	0,148	0,025	0,104
SnO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FeO	0,914	0,720	0,543	0,932	0,663
Fe	0,710	0,560	0,422	0,724	0,515
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,100	0,117	0,163	0,054	0,061
Cr	0,068	0,080	0,112	0,037	0,042
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,505	0,463	0,498	0,547	0,480
V	0,283	0,259	0,279	0,306	0,269
MnO	0,012	0,010	0,011	0,016	0,014
Mn	0,009	0,008	0,009	0,012	0,011
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,275	0,262	0,273	0,217	0,173
Nb	0,192	0,183	0,191	0,152	0,121
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ta	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ZrO <sub>2</sub>	0,071	0,052	0,179	0,103	0,017
Zr	0,053	0,038	0,133	0,076	0,013
Total	101,715	101,242	101,687	101,049	101,342

(continuação)

Amostra: FSJJ-06-12					
Zona: Mineralizada					
Classificação	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo
SiO <sub>2</sub>	0,271	0,035	0,339	0,335	0,048
Si	0,130	0,020	0,160	0,160	0,020
TiO <sub>2</sub>	98,330	98,013	99,108	97,731	99,357
Ti	58,950	58,760	59,410	58,590	59,560
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,068	0,006	0,087	0,071	0,016
Al	0,040	0,00	0,050	0,040	0,010
CaO	0,110	0,065	0,091	0,143	0,028
WO <sub>3</sub>	0,069	0	0,747	1,942	0
W	0,055	0,000	0,592	1,540	0,000
SnO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FeO	0,729	0,705	0,949	1,500	0,464
Fe	0,567	0,548	0,738	1,166	0,361
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,014	0,022	0,009	0,014	0,037
Cr	0,010	0,015	0,006	0,010	0,025
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,475	0,474	0,484	0,480	0,480
V	0,266	0,266	0,271	0,269	0,269
MnO	0,00	0,001	0,00	0,00	0,003
Mn	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,014	0,00
Sb	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,226	0,292	0,247	0,242	0,199
Nb	0,158	0,204	0,173	0,169	0,139
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ta	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ZrO <sub>2</sub>	0,222	0,244	0,208	0,252	0,123
Zr	0,164	0,181	0,154	0,187	0,091
Total	100,514	99,857	102,269	102,724	100,755

(continuação)

Amostra: FSJJ-06-25					
Zona: Mineralizada					
Classificação	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo
SiO <sub>2</sub>	0,181	0,659	0,168	0,172	0,254
Si	0,080	0,310	0,080	0,080	0,120
TiO <sub>2</sub>	98,713	99,233	99,598	98,481	98,707
Ti	59,180	59,490	59,710	59,040	59,170
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,050	0,066	0,010	0,124	0,025
Al	0,030	0,030	0,010	0,070	0,010
CaO	0,210	0,088	0,291	0,306	0,396
WO <sub>3</sub>	0,00	0,022	0,00	0,00	0,00
W	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000
SnO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FeO	0,672	0,842	0,819	0,501	0,418
Fe	0,522	0,654	0,637	0,389	0,325
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,036	0,019	0,014	0,016	0,012
Cr	0,025	0,013	0,010	0,011	0,008
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,568	0,603	0,621	0,621	0,564
V	0,318	0,338	0,348	0,348	0,316
MnO	0,00	0,00	0,008	0,004	0,005
Mn	0,000	0,000	0,006	0,003	0,004
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,029	0,029	0,008	0,002	0,019
Sb	0,024	0,024	0,007	0,002	0,016
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,204	0,805	0,803	0,326	0,312
Nb	0,143	0,563	0,561	0,228	0,218
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,001	0,038	0,00	0,00
Ta	0,000	0,001	0,031	0,000	0,000
ZrO <sub>2</sub>	0,117	0,168	0,281	0,209	0,153
Zr	0,087	0,124	0,208	0,155	0,113
Total	100,78	102,535	102,659	100,762	100,865

(continuação)

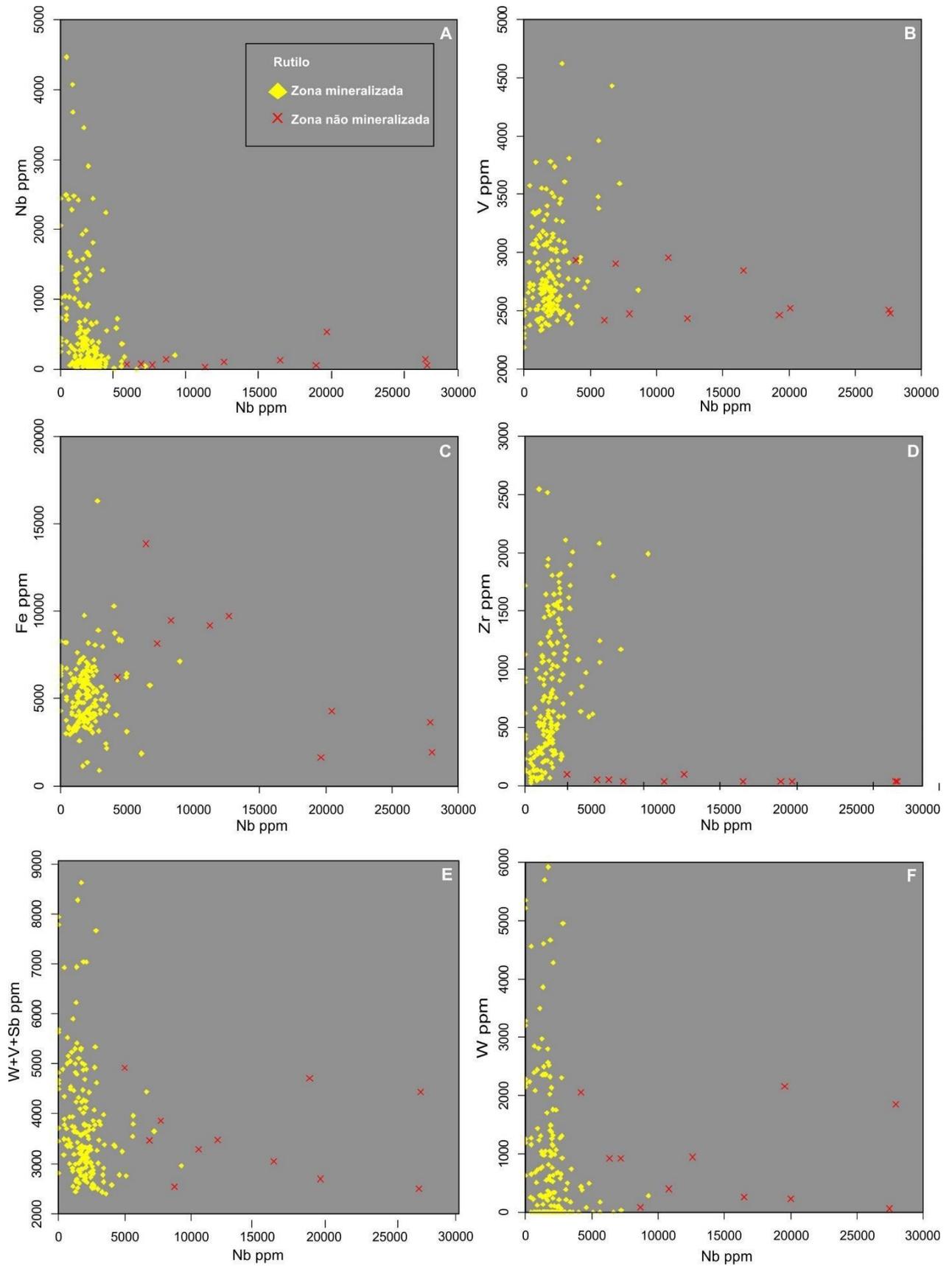
Amostra: FSJJ-09-07					
Zona: Estéril					
Classificação	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo
SiO <sub>2</sub>	0,760	0,015	0,031	0,028	0,040
Si	0,360	0,010	0,010	0,010	0,020
TiO <sub>2</sub>	98,521	99,431	99,554	98,001	98,594
Ti	59,060	59,610	59,680	58,750	59,110
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,111	0,003	0,005	0,002	0,003
Al	0,060	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	1,496	0,745	0,502	0,835	1,046
WO <sub>3</sub>	0,055	0	0	0	0
W	0,044	0,000	0,000	0,000	0,000
SnO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FeO	0,523	1,325	0,147	0,113	0,308
Fe	0,407	1,030	0,114	0,088	0,239
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,021	0,01	1,01	0,016	0,047
Cr	0,014	0,007	0,691	0,011	0,032
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,521	0,453	0,493	0,583	0,791
V	0,292	0,254	0,276	0,327	0,443
MnO	0,00	0,053	0,002	0,00	0,002
Mn	0,000	0,041	0,002	0,000	0,002
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,002	0,004	0	0	0,001
Sb	0,002	0,003	0,000	0,000	0,001
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,600	0,575	0,239	0,415	0,951
Nb	0,419	0,402	0,167	0,290	0,665
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,022	0,00	0,078	0,082
Ta	0,000	0,018	0,000	0,064	0,067
ZrO <sub>2</sub>	0,086	0,146	0,063	0,080	0,243
Zr	0,064	0,108	0,047	0,059	0,180
Total	102,696	102,782	102,046	102,151	102,108

(conclusão)

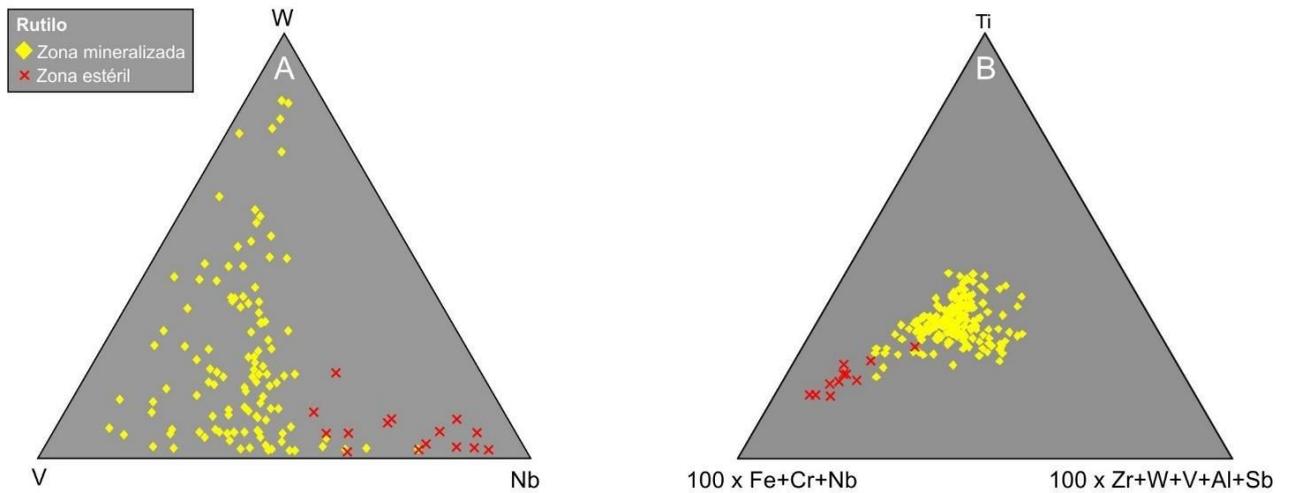
Amostra: FSJJ-09-17					
Zona: Estéril					
Classificação	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo	Rutilo
SiO <sub>2</sub>	0,034	0,019	0,00	0,008	0,005
Si	0,020	0,010	0,00	0,00	0,00
TiO <sub>2</sub>	98,372	99,106	98,772	99,39	98,206
Ti	58,970	59,410	59,210	59,580	58,870
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,022	0,016	0,009	0,014	0,013
Al	0,010	0,010	0,00	0,010	0,010
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WO <sub>3</sub>	0,126	0,123	0,045	0,123	0,253
W	0,100	0,098	0,036	0,098	0,201
SnO <sub>2</sub>	0,025	0,00	0,00	0,00	0,006
Sn	0,020	0,000	0,000	0,000	0,005
FeO	1,229	1,713	1,165	1,047	0,818
Fe	0,955	1,332	0,906	0,814	0,636
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,075	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,051	0,000	0,000	0,000	0,000
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,438	0,436	0,523	0,515	0,520
V	0,245	0,244	0,293	0,288	0,291
MnO	0,014	0,165	0,009	0,011	0,005
Mn	0,011	0,128	0,007	0,009	0,004
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,807	0,994	1,625	1,107	0,717
Nb	1,263	0,695	1,136	0,774	0,501
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,080	0,108	0,385	0,158	0,094
Ta	0,066	0,088	0,315	0,129	0,077
ZrO <sub>2</sub>	0,007	0,002	0,00	0,002	0,007
Zr	0,005	0,001	0,000	0,001	0,005
Total	102,229	102,682	102,533	102,375	100,644

### 3.6 DIAGRAMAS GEOQUÍMICOS

Com base nos resultados analíticos obtidos, foi possível elaborar diagramas geoquímicos binários e ternários discriminantes para os rutilos presentes nas zonas mineralizada e estéril do depósito São Jorge (Figuras 15 e 16).



**Figura 15.** Análises em rutilo no GSJJ em cristais da zona mineralizada (losango amarelo) e zona estéril (x vermelho). Os diagramas mostram o comportamento de alguns elementos na ZM e ZE em relação ao nióbio. (a) Diagrama Al vs Nb ppm; (b) V vs Nb ppm; (c) Fe vs Nb; (d) Zr vs Nb ppm; (e) W+V+Sb vs Nb ppm; (f) W vs Nb ppm.



**Figura 16.** Análises em cristais de rutilo das zonas mineralizada (losango amarelo) e estéril (x vermelho), GSJJ . (A) Rutilos da zona mineralizada mostram conteúdos mais elevados de V e W, enquanto os da zona estéril confirmam um maior enriquecimento em Nb. (B) Os rutilos da zona mineralizada plotam predominantemente no centro do diagrama, confirmando seu maior enriquecimento em Zr+W+V+Al+Sb, enquanto os da zona estéril se aproximam do vértice Fe+Cr+Nb. Concentrações em ppm.

## CAPÍTULO 4: DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

No decorrer deste estudo, após análises petrográficas, imageamentos por MEV, por EBSD e análises por microsonda eletrônica, foi possível estabelecer diferenças morfológicas e composicionais marcantes entre cristais de rutilo da zona mineralizada em Au (ZM) e da zona estéril (ZE) do Granito São Jorge Jovem (GSJJ).

Para identificação de cristais de rutilo e anatásio, as análises em EBSD se mostraram indispensáveis por diferenciar os cristais observando seus limites morfológicos. As análises em EBSD indicaram que o rutilo é o polimorfo predominante nas rochas do GSJJ. Não foram encontrados cristais de brookita, e o anatásio foi registrado apenas de forma local e espaçada, sem que fosse possível distinguir a morfologia deste mineral e, portanto, ele não foi analisado por microsonda eletrônica.

### 4.1 MORFOLOGIA

Com base nas imagens obtidas por MEV, é possível afirmar que os rutilos das zonas mineralizadas (ZM) são muito mais abundantes que na zona estéril (ZE). Na ZE, o principal mineral de titânio é representado pela titanita, seguido pela ilmenita. Nesta zona, as titanitas ocorrem amplamente como cristais idiomórficos, bem desenvolvidos e com baixo grau de alteração.

Os rutilos presentes na zona ZE do GSJJ apresentam aspectos morfológicos compatíveis com minerais de origem magmática, ou seja, formam cristais idiomórficos, por vezes zonados, e ocorrem frequentemente como inclusões em biotitas primárias. Em amostras da ZE com alteração hidrotermal incipiente, foi observada a presença de rutilo alterando as bordas de alguns cristais de titanita.

O rutilo é o mineral de titânio predominante na zona mineralizada (ZM). Os cristais ocorrem principalmente como pseudomorfos na titanita, apresentando formas esqueléticas. Não foram encontrados cristais de rutilo na ZM formados a partir da alteração da ilmenita, como encontrado em outros estudos (ex. Agangi *et al.* 2019). Os rutilos da ZM também são vistos em textura halotriomórfica em contato com mica branca. Em menor quantidade, foram observados cristais aciculares de rutilo inclusos ou em contato com cristais de quartzo hidrotermal.

As características morfológicas observadas nos rutilos da ZM sugerem que eles são resultantes ou tiveram forte participação dos processos hidrotermais que afetaram o depósito São Jorge em diferentes intensidades.

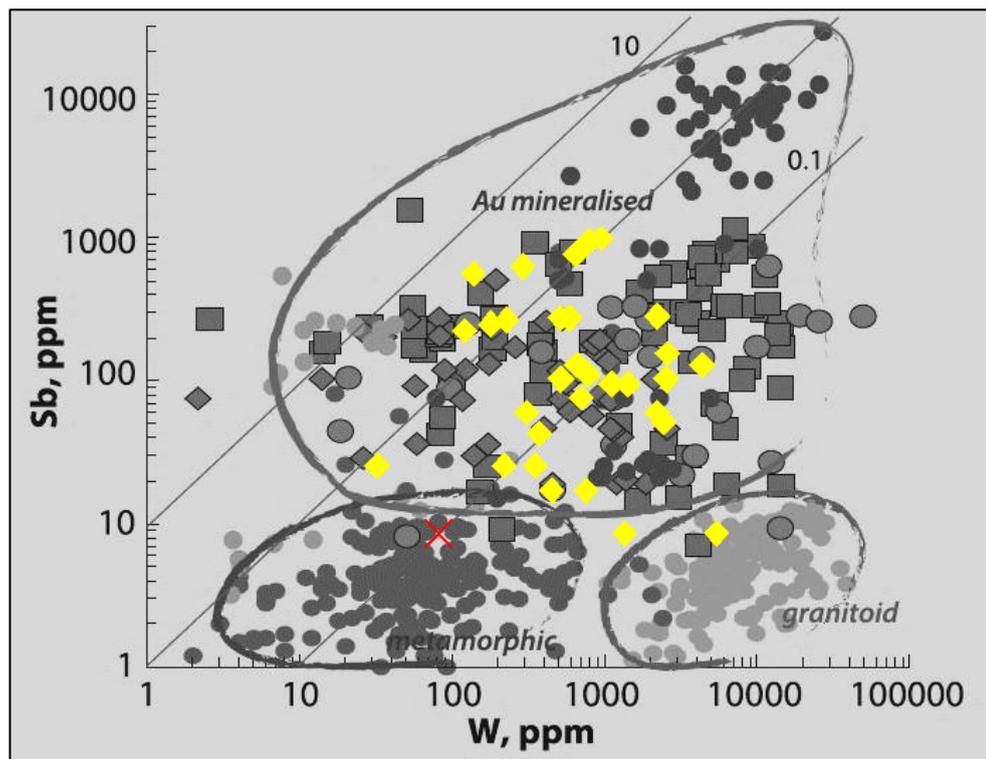
## 4.2 QUÍMICA MINERAL

As análises WDS em rutilo das zonas mineralizadas (ZM) e não mineralizadas (ZE) do Granito São Jorge Jovem GSJJ mostraram diferenças composicionais significativas. Não há registros de trabalhos que abordem este tema atualmente no Brasil. Entretanto, autores de outros países têm estudado as características morfológicas e composicionais de rutilos em depósitos de Au e comparado com rutilos de outros tipos de depósitos minerais e contextos geológicos distintos.

A partir de diagramas binários e ternários, são destacadas algumas diferenças composicionais importantes. Os rutilos das ZE do GSJJ exibem enriquecimento marcante em Nb (> 5.000 ppm) e Ta (600 – 19000 ppm). Os elevados teores destes elementos podem estar associados a própria característica do GSJJ. Estas rochas com fracionamento considerável (magmas félsicos) são comumente ricas em cátions HFSE (*high field strength elements*, 5<sup>+</sup> e 6<sup>+</sup>).

Análises em rutilos das ZM mostram um *trend* de enriquecimento em Al, V e Zr (Figuras 14 e 15). Algumas análises apontam, ainda, enriquecimento em Sb. Os baixos teores de Sb detectados nos rutilos do GSJJ pode estar associada ao limite de detecção da microsonda eletrônica. Contudo, os teores de Sb encontrados no GSJJ são compatíveis com os resultados apresentados por Agangi *et al.* (2019), conforme abordado a seguir.

Agangi *et al.* (2019) exploraram a aplicabilidade do rutilo como indicador metalogenético de depósitos orogênicos de ouro. Os autores utilizaram rutilos provenientes de depósitos de ouro orogênico com rochas de origem metamórfica ( fácies xisto verde). Estes autores encontraram características distintas em rutilos provenientes de rochas com mineralização, em especial, elevados conteúdos de Sb, W e Sn, quando comparados a rutilos de rochas não mineralizadas. A Figura 17 mostra o diagrama Sb vs W (ppm) proposto por Agangi *et al.* (2019). Os dados em cinza são oriundos dos autores, juntamente com dados da literatura. Os losangos amarelos (rutilos da ZM) e o símbolo vermelho (rutilos da ZE) são provenientes do GSJJ. Observa-se que os rutilos da ZM do GSJJ acompanham, em sua maioria, as amostras com mineralização de Au proposta por Agangi e colaboradores.



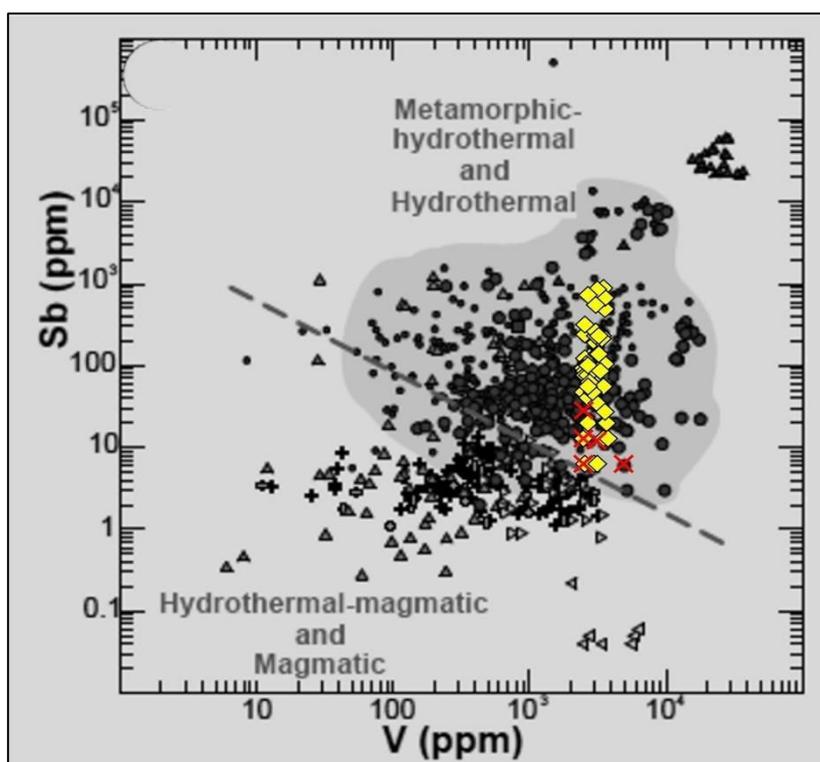
**Figura 17.** Diagrama proposto por Agangi *et al.*(2019) com dados obtidos neste trabalho para o GSJJ. Losango amarelo: rutilos da zona mineralizada; x vermelho: rutilo da zona estéril.

Sciuba & Beaudoin (2021) estudaram os aspectos texturais e composicionais de cristais de rutilo em depósitos de Au orogênico de diversos depósitos, incluindo depósitos de classe mundial. Os autores concluíram que o rutilo é o mineral predominante em depósitos de Au orogênico. A partir de diagramas binários, os autores concluíram que a composição das rochas encaixantes exerce um forte controle sobre as concentrações de V, Nb, Ta e Cr no rutilo, enquanto as fácies metamórficas das rochas encaixantes controlam as concentrações de V, Zr, Sc, U, elementos de terras raras, Y, Ca, Th e Ba presentes no rutilo. Os autores propuseram alguns diagramas para diferenciar rutilos de depósitos metamórfico-hidrotermais e hidrotermais de rutilos provenientes de depósitos magmático-hidrotermais e magmáticos. O uso destes diagramas, atrelado a outras ferramentas metalogenéticas, podem ajudar a compreender a origem metalogenética de depósitos de ouro que ainda estejam em discussão.

As Figuras 18 e 19 mostram os diagramas propostos por Sciuba & Beaudoin (2021). Trata-se de diagramas envolvendo vários tipos de depósitos minerais e rochas estéreis. É válido mencionar que os dados utilizados nesses diagramas foram obtidos a partir de análises em microsonda eletrônica. A Figura 18 exibe o diagrama Sb vs V (ppm), com dados obtidos pelos autores e também da literatura sobre depósitos de Au de origem metamórfico-hidrotermal e hidrotermal (Ouro orogênico, depósito Hemlo, depósitos tipo Sulfeto Maciço Vulcanogênico

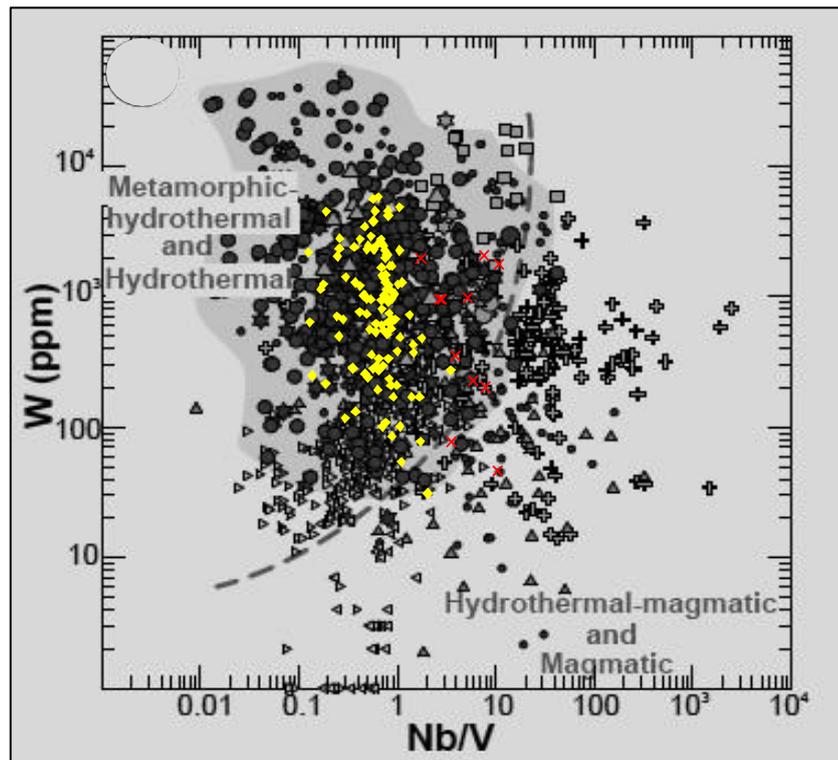
(VMS), e outros tipos de depósitos de ouro) vs depósitos de Au de origem magmática-hidrotermal e magmática (Cu- pórfiro; Cu-Au-pórfiro; Greisen Cu-Mo-W; IOCG; mineralizações de W, Sn e W-Sn em pegmatitos, granitos, sienitos).

Os dados obtidos para os rutilos do GSJJ (losango amarelo = ZM; cruz vermelha = ZE) plotados no diagrama abaixo, indicam que os rutilos do depósito São Jorge são semelhantes a rutilos de depósitos de classe metamórfica-hidrotermal ou hidrotermal.



**Figura 18.** Diagrama proposto por Sciuba & Beaudoin (2021) com dados obtidos neste trabalho para o GSJJ. Losango amarelo: rutilos da zona mineralizada; Cruz vermelha: rutilo da zona estéril. Os rutilos da ZE e ZM do GSJJ são compatíveis com aqueles de depósitos metamórfico-hidrotermal e hidrotermal apresentados pelos autores.

A Figura 19 aborda o uso do diagrama W (ppm) vs Nb/V com dados obtidos por Sciuba & Beaudoin (2021) e da literatura, envolvendo depósitos de Au de origem metamórfica-hidrotermal e hidrotermal vs depósitos de Au de origem magmática-hidrotermal e magmática. Os dados obtidos nos rutilos do GSJJ, plotados no diagrama abaixo, sugerem novamente que os rutilos do depósito São Jorge estão associados a rutilos de depósitos de Au da classe metamórfica-hidrotermal ou hidrotermal.



**Figura 19.** Diagrama proposto por Sciuba & Beaudoin (2021) com rutilos deste trabalho (Losango amarelo: rutilos da ZM; x vermelho: rutilo da ZE). Os rutilos da ZE e ZM do GSJJ se sobrepõem aos rutilos de depósitos metamórfico-hidrotermais e hidrotermais apresentados pelos autores do diagrama.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo mostrou que as morfologias e composições químicas presentes nos rutilos do Granito São Jorge Jovem (GSJJ), hospedeiro do depósito de Au São Jorge, apresentam diferenças marcantes ao comparar cristais da zona mineralizada e da zona estéril. Enquanto na zona estéril o mineral de titânio predominante é representado pela titanita, na zona mineralizada, o rutilo é o principal mineral de titânio.

A partir das análises morfológicas, é possível afirmar que os cristais de rutilo encontrados na zona com mineralização de ouro são provenientes predominantemente da desestabilização de titanitas magmáticas. Nota-se que o avanço do processo de alteração hidrotermal nas rochas do depósito São Jorge é seguido pela abundância de rutilo nestas associações.

A concentração de determinados elementos (em especial Sb, V, Nb e W) nos rutilos do depósito São Jorge é compatível com rutilos de depósitos da classe metamórfico-hidrotermal e hidrotermal, em especial de depósitos orogênicos.

Estes resultados reforçam que a temática apresentada neste trabalho não é simples de ser abordada, e que a classificação das fases de  $TiO_2$  apenas por meio dos aspectos texturais ou diagramas composicionais não é viável. É necessário o uso de ferramentas robustas e diversificadas para que haja o aumento da confiabilidade dos dados obtidos. De acordo com as análises de DRX e EBSD, o rutilo é o polimorfo de  $TiO_2$  amplamente predominante no GSJJ.

As composições químicas no rutilo indicaram diferenças importantes. Enquanto os cristais das ZE exibem teores elevados de Nb e Ta, os cristais das ZM são enriquecidos em Al, V, Zr e, em menor quantidade, Sb. Para elementos com teores naturalmente menores que ocorrem nos cristais de rutilo (ex. Sb, Sn, Mn, U), é recomendado o uso de técnicas analíticas mais refinadas para se obter resultados mais concretos e confiáveis (ex. *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry - LA-ICP-MS*).

É notório salientar que este estudo foi realizado somente no Granito São Jorge Jovem, enquanto outros autores da literatura citados comparam seus dados com rutilos de outros depósitos ou de rochas com gêneses distintas. Com esta abordagem, é possível observar as alterações morfológicas e composicionais nos cristais de rutilo em um mesmo corpo granítico, além de poder comparar tais modificações com a intensidade da alteração hidrotermal, e

consequentemente, da mineralização presente.

Devido à metodologia extensa, a quantidade inicial de amostras deve ser avaliada com cautela. Deve ser considerado a escassez de minerais de  $\text{TiO}_2$  nas amostras, as perdas naturais de conteúdo durante a preparação das amostras, bem como a preparação especial de lâminas e pó de amostras para análises de EBSD, LA-ICP-MS e DRX.

## REFERÊNCIAS

- Agangi A., Reddy S.M., Plavsa D., Fougerouse 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.
- Aguja-Bocanegra M.A. 2013. *Mineralizações epitermais low-sulfidation e do tipo pórfiros superpostas associadas ao magmatismo félsico de 1,88 Ga na parte norte da Província Mineral do Tapajós (PA)*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 188p.
- Almeida F.F., Hasui Y., Brito Neves B.B. 1976. The Upper Precambrian of South America. *Boletim IG*, Instituto de Geociências da USP, **7**:45-80.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews*, **17**(1):1-29.
- Almeida M.E., Brito M.F.L., Macambira M.J.B. 1999. Carocçal Granite: 207Pb-206Pb evaporation age in post-collision granitoids of Tapajós Gold Province, Amazonian region, Brazil. *In: South American Symposium on Isotope Geology, 2, Cordoba. Actas.*, Cordoba. p.3-6.
- Almeida M.E., Brito M.F.L., Ferreira A.L., Monteiro M.A.S. 2000. *Geologia e recursos minerais da folha Mamãe Anã (SB.21-V-D): Estados do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. Nota explicativa*. Brasília, DF, CPRM - Serviço Geológico do Brasil (Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós - PROMIN Tapajós). 74 p.
- 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. *In: Reis N.J. & Monteiro, M.A.S. (orgs.). Contribuições a geologia da Amazônia*, Manaus, SBG-NO, v.2, p. 57-112.
- Borges R.M.K., Dall'Agnol R., Lamarão C.N., Figueiredo M.A.B., 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.
- Borges A.W.G. 2010. *Geologia e metalogênese do depósito aurífero São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Novo Progresso - PA*. MS Dissertation,. Universidade Federal do Pará: 94p.
- Borgo A., Biondi J.C., Chauvet A., Bruguier O., Monié P., Baker T., Ocampo R., Friedman R., Mortensen J. 2017. Geochronological, geochemical and petrographic constraints on the Paleoproterozoic Tocantinzinho gold deposit (Tapajós Gold Province, Amazonian Craton - Brazil): Implications for timing, regional evolution and deformation style of its host rocks. *Journal of South American Earth Sciences*, (75): 92-115.
- Bromiley G.D.& Hilairt N. 2005. Hydrogen and minor elements incorporation in synthetic rutile. *Mineralogical Magazine*, **69**: 345–358.

Clark J.R. & Williams-Jones A.E. 2004. *Rutile as a potential indicator mineral for metamorphosed metallic ore deposits*. Montreal, Quebec, Canada DIVEX, relatório final, Sous-projet SC2, 17p.

Dall'Agnol R., Silva C.M.G., Scheller T. 1999. Fayalite-hedenbergite rhyolites of Iri Formation, Tapajós Gold Province, Amazonian Craton: implication for the Uatumã volcanism. In: SBG, 1º Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, Gramado. *Boletim de resumos*, Gramado. p. 31.

Dardenne M.A. & Schobbenhaus C. 2001. *Metalogênese do Brasil*. Brasília-DF, Ed. UnB, p. 78-83.

Echeverri-Misas C.M. 2015. *Geologia e alteração hidrotermal das rochas vulcânicas e plutônicas paleoproterozoicas na porção sul da Província Aurífera do Tapajós (PA)*. PhD Theses,- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 190 p.

El Goresy A., Dubrovinsky L., Gillet P., Graup G. Chen, M. 2010. Akaogiite: an ultra-dense polymorph of TiO<sub>2</sub> with the baddeleyite-type structure, in shocked garnet gneiss from the Ries Crater, Germany. *American Mineralogist*, **95**: 892-895.

Faraco M.T.L., Carvalho J.M.A., Klein E.L. 1996. *Carta metalogenética da Província Aurífera do Tapajós*. [S.l.], CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

Fernandes C.M.D., Juliani C., Monteiro L.V.S., Lagler B., Misas C.M.E. 2011. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil: Exclusively crustal sources or hybridized Nd modelages? *Journal of South America Earth Sciences*, **32**: 351-368.

Ferreira A.L., Almeida, M.E., Brito, M.F.L. & Monteiro, M.A.S. 2000. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós. Geologia e Recursos Minerais da Folha Jacareacanga, SB.21-Y-B. Estado do Amazonas e Pará. Escala 1: 250.000. Nota Explicativa. Manaus: CPRM.

Ferreira A.L., Rizzotto G.J., Quadros M.L.E.S., Bahia R.B.C., Oliveira M.A. 2004. Folha SB.21- Tapajós. In: Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S., Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B., Jesus J.D.A. (Eds.) *Carta geológica do Brasil ao milionésimo*: Sistema de informações geográficas-SIG, Brasília, Programa Geologia do Brasil. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

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*, 167-179. doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.01.016.

Juliani C., Corrêa-Silva R.H., Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Nunes C.M.D., 2002. The Batalha Au-Granite system - Tapajós Province, Amazonian Craton, Brazil: Hydrothermal alteration and regional implication. *Precambrian Research*, 119:225-256.

Juliani C., Vasquez M.L., Klein E.L., Villas R.N.N., Echeverri-Misas C.M., Santiago E.S.B., Monteiro L.V.S., Carneiro C.C., Fernandes C.M.D., Usero G. 2014. Metalogenia da Província Tapajós. In *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*; Silva M.G., Rocha Neto M.G., Jost H., Kuyumjian R.M., Eds.; CPRM-Serviço Geológico do Brasil: Belo Horizonte, Brazil, 2014; Volume 1, pp. 229-268.

Klein E.L., Almeida M.E., Vasques M.L., Bahia R.B.C., Quadros M.L.E.S., Ferreira A.L. 2001. *Geologia e recursos minerais da Província Mineral do Tapajós, Estados do Pará e Amazonas. Folhas SB.21-V-D, SB.21-Y-B, SB.21-X-C, SB.21-Z-A e SB.21-Z-C. Escala 1:500.000.* Brasília, DF, CPRM - Serviço Geológico do Brasil (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós -PROMIN Tapajós).

Klein E.L. & Vasquez M.L. 2000. *Geologia e recursos minerais da Folha Vila Riozinho SB.21-Z-A, Estado do Pará, escala 1:250.000.* Brasília, CPRM, 1 CD-ROM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (Promin- Tapajós).

Lamarão C.N. 2001. *Geologia, geoquímica e geocronologia do magmatismo paleoproterozoico da região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico.* Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará: 285 p.

Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Lafon J.M., Lima E.F. 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 granitóides Paleoproterozóicos da região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasil. 34: 95-108.

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

Lamarão C.N., Souza K.S., Dall'Agnol R., Galarza M.A. 2008. Granitos pórfiros da região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós: petrografia e geocronologia. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(3): 533-543.

Lampadius W.A. 1800. Nochein Paar Bemertungenüberden Uran- und Titange halteiniger Fossilien. Der rotheschörl (Rutil, nachherrnBergrath Werner), in Sammlungpractisch-chemischer AbhandlungenundvermischerBemerkungen, **3**, Walther Dresden.

Ludwig C. F. 1803. Rutil, in Handbuch der Mineralogienach A. G. Werner, Volume 1 Siegfried Lebrécht Crusius Leipzig, 305-306.

Luvizotto G.L., Zack T., Meyer H.P., Ludwig T., Triebold S., Kronz A., Münker C., Stockli D.F., Prowatke S., Klemme S., Jacob D.E., Von Eynatten H. 2009. Rutile crystals as potential trace element and isotope mineral standards for microanalysis. *Chemical Geology*, **261**: 346–369.

Meinhold G. Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Science Reviews*, **102**: 1-28.

Mindat. 2020. *Rutile*: Mineral information, data and localities. Disponível em: <https://www.mindat.org/min-3486.html>. Acesso em: 05 jan. 2020.

Moura C.A.V., Gorayeb P.S.S., Matsuda N.S. 1999. Geocronologia Pb-Pb em zircão do riolito Vila Raiol, Formação Iriri - Sudoeste do Pará. *In*: SBG, 6º Simpósio de geologia da Amazônia,

Manaus. *Resumos expandidos*, Manaus, p. 475-477.

Oliveira H.T. 2018. *Estudo de inclusões fluidas e química mineral do depósito aurífero do Alvo Jerimum de Baixo, campo mineralizado do Cuiú-Cuiú, Província Aurífera do Tapajós, Pará*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará: 95p.

Passchier C.W., R.A.Trouw. 2005. *Microtectonics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2ed. 336p.

Pessoa M.R., Santiago A.F., Andrade A.F., Barreto E.L., Nascimento J.O., Santos J.O.S., Oliveira J.R., Lopes R.C., Prazeres W.V. 1977. *Projeto Jamanxim*. CPRM/DNPM, v. 1-3, 614p.

Plavsa D., Reddy S.M., Agangi A., Clark C., Kylander-Clark A., Tiddy C.J. 2018. Microstructural, trace element and geochronological characterization of TiO<sub>2</sub> polymorphs and implications for mineral exploration. *Chemical Geology*, 476: 130-149.

Randle V. 2004. Application of electron backscatter diffraction to grain boundary characterization. *International Materials Reviews*, 49:1-11.

Rice C., Darke K., Still J. 1998. Tungsten-bearing rutile from the Kori Kollogold mine, Bolivia. *Mineralogical Magazine*, 62: 421-429.

Rudnick R.L. & Fountain D.M., 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, **33**: 267-309.

Salama W., Anand R., Roberts M. 2018. Cassiterite and rutile as indicator minerals for exploring the VMS system. Australian Exploration Geoscience Conference AEGC, Sidney, Australia. 4p.

Santos J.O.S., Groves D.I., Hartmann L.A., Moura M.A., McNaughton N.J. 2001. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, 36(3-4): 278-299.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Faria M.S., Riker S.R., Souza M.M., Almeida M.E., McNaughton N.J. 2006. A compartimentação do cráton amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. *In: 9º SBG-NO, Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, resumos expandidos, SBG*.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology. *Gondwana Research*, 3(4): 453-488.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2002. Timing of mafic magmatism in the Tapajós Province (Brazil) and implications for the evolution of the Amazon Craton: evidence from baddeleyite and zircon U-Pb SHRIMP geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(4):409-429.

Santos J.O.S., Rizzotto G.J., Potter P.E., McNaughton N.J., Matos R.S., Hartmann L.A., Chemale Jr. F., Quadros M.E.S. 2008. Age and autochthonous evolution of the Sunsás Orogen in West Amazon Craton based on mapping and U-Pb geochronology. *Precambrian*

*Research*, 165(3-4): 120-152.

Santos J.O.S., Van Breemen O.B., 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*, 131(1-2): 73-109.

Santos M.D., Aquino L.B.M., Serra V.F.H., Lima M.V.G.R., Galarza M.A., Lafon J.M. 2013. Geocronologia das rochas hospedeiras e do minério com implicações na gênese do depósito aurífero Palito, Província Tapajós, sudoeste do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 13., Belém, Resumos Expandidos... SBG: Belém, 1 CD-ROM.

Sato K.; Tassinari C.C.G. Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico, baseado em idade modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. In: Costa, M.L.; Angélica, R.S. (Coord.). Contribuições à geologia da Amazônia. Belém: SBG, 1997. v.1, p. 91-142.

Sciuba M., Beaudoin G. 2021. Texture and trace element composition of rutile in orogenic gold deposits. *Economy Geology*, 116 (8): 1865-1892.

Scott K.M. 2005. Rutile geochemistry as a guide to porphyry Cu–Au mineralization, Northparkes, New South Wales, Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5: 247–253.

Semblano F.R.D., Macambira M.J.B., Vasquez M.L. 2016. Petrography, geochemistry and Sm-Nd isotopes of the granites from eastern of the Tapajós Domain, Pará state. *Brazilian Journal of Geology*, 46:509-529.

Souza S.R.C. 2009. *Petrografia, litogeoquímica, geocronologia e geoquímica isotópica da mineralização aurífera e rochas hospedeiras do prospecto Água Branca, Província Tapajós*. 106f. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasília.

Tassinari C.C.G. 1996. *O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos*. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 139 f.

Tassinari C.C.G., Bettencourt J.S., Geraldés M.C., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. The Amazonian Craton. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz F.A., Campos D.A. (Eds.) *Tectonic Evolution of South America*, Rio de Janeiro, 31st International Geological Congress, SBG, p.41-95.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22(3): 174-182.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Dal Ré Carneiro C., Brito Neves B.B. (Eds.). *Geologia do continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo, Beca, p. 471-485.

Tokashiki C.C. 2015. *Eventos vulcânicos de 1,97 Ga com mineralizações de ouro epitermais low e intermediate-sulfidation na porção sul da Província Mineral do Tapajós (PA)*. In: Gorayeb P.S.S. & Lima, A.M.M. (orgs.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, SBG, v. 9, p. 437- 449.

Tschauner O. & Ma C. 2017. Riesite, IMA 2015-110a. CNMNC Newsletter No. 35, February 2017; *Mineralogical Magazine*, **81**: 209-213.

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

Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Silva C.M.G., Klein E.L. 2008. *Compartimentação tectônica*. In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (org.). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará*. Texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Belém, CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Unidade 2, p.39-112.

Vasquez M.L. & Dreher A.M. 2011. Uma avaliação da estratigrafia dos eventos magmáticos de 1900-1860 Ma do Cráton Amazônico. In: 12° Simpósio de Geologia da Amazônia. Boa Vista, *Resumos Expandidos*.

Vasquez M.L., Chaves C.L., Melo E.M., Oliveira J.K.M. 2017. *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 - Serviço Geológico do Brasil. 305p.

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*, **13** (1): 111-138.

Werner A.G. 1911. In: *Encyclopedia Britannica*, 28, 11th ed. Londres, p.523.

Yokoi Y.O., Oliveira A.L.A.M., Tachibana J.2001.General economic geology of the High Tapajós Basin (The “Cachimbo” Graben) and its boundaries: A regional geological survey with exploratory purpose. In: SBG, 7° Simpósio de geologia da Amazônia, Belém. *Resumos expandidos*.