



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 466

**QUARTZO MAGMÁTICO E HIDROTHERMAL DO DEPÓSITO
DE OURO SÃO JORGE, PROVÍNCIA AURÍFERA DO
TAPAJÓS-PA: PETROGRAFIA, MEV-CL E IMPLICAÇÕES
METALOGENÉTICAS**

Dissertação apresentada por:

ALDEMIR DE MELO SOTERO

Orientador: Prof. CLAUDIO NERY LAMARÃO (UFPA)

**BELÉM
2015**

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

Sotero, Aldemir de Melo, 1988-

Quartzo magmático e hidrotermal do depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós-PA: petrografia, MEV-CL e implicações metalogenéticas / Aldemir de Melo Sotero. – 2015
xii, 46 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Claudio Nery Lamarão

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2015.

1. Microscopia eletrônica de varredura - Tapajós, Região (PA).
2. Catodoluminescência. 3. Quartzo - Tapajós, Região (PA). 4. Ouro - Tapajós, Região (PA). I. Título.

CDD 22. ed. 502.825098115



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

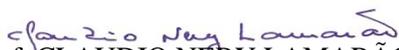
**QUARTZO MAGMÁTICO E HIDROTHERMAL DO
DEPÓSITO DE OURO SÃO JORGE, PROVÍNCIA AURÍFERA
DO TAPAJÓS-PA: PETROGRAFIA, MEV-CL E IMPLICAÇÕES
METALOGENÉTICAS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
ALDEMIR DE MELO SOTERO

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

Data de Aprovação: 05 / 08 / 2015

Banca Examinadora:


Prof. CLAUDIO NERY LAMARÃO
(Orientador-UFPA)


Prof. EVANDRO LUIZ KLEIN
(Membro-CPRM)


Prof. HILTON TÚLIO COSTI
(Membro-MPEG)

*Dedico este trabalho aos meus pais
Manoel Sotero e Oleia Sotero, por me
mostrarem o caminho da dignidade.*

AGRADECIMENTOS

- Em primeiro lugar a Deus e ao Evangelho Cristão, que têm me dado vida em abundância;
- Aos meus pais (Manoel Sotero e Oleia Sotero), minha irmã (Osiléia Sotero Lima), meu irmão (Miquéias Sotero – *in memorian*) e minha namorada (Priscila Santos) por todo o amor a mim ofertado;
- Ao professor Dr. Cláudio Nery Lamarão, pela sua orientação, conhecimento, amizade e respeito;
- Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG-UFPA) e ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica-PPGG, pela infraestrutura acadêmica;
- Ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) da UFPA e à Linha de Pesquisa em Quartzo e Zircão (LPQZ), pela infraestrutura técnica;
- Ao Laboratório de Microanálises da UFPA e seus membros Ana Paula Correa e Gisele Marques, pelo apoio técnico durante as etapas laboratoriais;
- Ao Instituto de Geociências da Amazônia – GEOCIAM (programa INCT – CNPq/MCT/FAPESPA – processo 573733/2008-2), com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES;
- Ao professor Dr. Régis Borges por disponibilizar as amostras dos furos de sondagem estudados neste trabalho. À ele meus sinceros agradecimentos;
- Ao professor Dr. Marcelo Vasquez junto à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), por também disponibilizar o seu laboratório de microscopia eletrônica de varredura;
- Aos meus amigos e irmãos Paulo Rodrigues, Chafic Neto, Rafael Estumano e Victor Feio pelos momentos de descontração e alegria nas horas vagas;
- Aos meus amigos e membros das salas 04 e 05 do PPGG, meu muito obrigado;
- A todos que contribuíram direta ou indiretamente ao desenvolvimento deste trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém pensou sobre aquilo que todo mundo vê”

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

O Depósito São Jorge, localizado no município de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, sudoeste do estado do Pará, está hospedado em rochas monzograníticas com 1,89 Ga, hidrotermalizadas em diferentes intensidades, pertencentes ao Granito São Jorge Jovem (GSJJ). Quatro tipos morfológico-texturais de quartzo (Qz1, Qz2, Qz3 e Qz4) foram identificados através de imagens de microscopia eletrônica de varredura-catodoluminescência (MEV-CL) nas associações minerais propostas por Borges *et al.* (2009) para a área do depósito de ouro São Jorge. Nas rochas mais preservadas (associação 1 e 2), ricas em anfibólio e biotita, ocorrem cristais anédricos de quartzo magmático, de luminescência moderada a alta (Qz1). Nas rochas alteradas (associações 2 e 3), fluidos pós-magmáticos a hidrotermais que afetaram o granito percolaram fraturas do Qz1 e cristalizaram Qz2 não luminescente (escuro). Nas rochas mais intensamente alteradas (associação 4), sucessivos processos de alteração, dissolução e recristalização deram origem a cristais de quartzo zonados, subédricos (Qz3) e euédricos (Qz4) tipicamente hidrotermais, sendo este último hospedeiro da mineralização aurífera. A evolução textural do quartzo está diretamente relacionada às atividades hidrotermais que afetaram as rochas do GSJJ. Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) e análises semiquantitativas por espectroscopia por dispersão de energia (EDS), identificaram duas gerações de ouro: Au1, enriquecido em Ag (4,3 a 23,7%) e incluso ou associado a cristais de Py; Au2, enriquecido em Te (1,1 a 17,2%) e incluso no Qz4. O estudo de cristais de quartzo através de MEV-CL forneceu informações morfológico-texturais importantes para o entendimento dos processos hidrotermais que atuaram na área mineralizada do depósito de ouro São Jorge, podendo esta metodologia ser aplicada em estudos de quartzo de outros depósitos hidrotermais.

Palavras-chave: MEV. Catodoluminescência. Quartzo. Ouro. Tapajós.

ABSTRACT

The São Jorge Deposit (DSJ), located in the municipality of Vila Riozinho, Gold Tapajós Province, southwest of Pará state, is hosted on 1.89 Ga monzogranite rocks, hydrothermalized at different intensities, belonging to the Younger São Jorge granite. Four morphological-textural types of quartz (Qz1, Qz2, Qz3 e Qz4) were identified through images of scanning electron microscopy-cathodoluminescence (SEM-CL) in the mineral assemblages proposed by Borges *et al.* (2009) to the area of the São Jorge gold deposit. In the most preserved rocks (assemblages 1 and 2), rich in amphibole and biotite, occur anhedral crystals of primary magmatic quartz, with moderate to high luminescence (Qz1). In the altered rocks (assemblages 2 and 3), post-magmatic to hydrothermal fluids affected the granite and percolated fractures in Qz1 and crystallized Qz2 not luminescent (dark). In the most intensely altered rocks (assemblage 4), successive alteration, dissolution and recrystallization processes gave rise to zoned subhedral (Qz3) and euhedral (Qz4) quartz crystals, typically hydrothermal, the latter being host of the gold mineralization. The textural evolution of quartz is directly related to hydrothermal fluids that affected the rocks of the Younger São Jorge granite. Backscattered electrons images (ERE) and semiquantitative analysis by energy dispersive spectroscopy (EDS) identified two generations of gold: Au1, enriched in Ag (4.3 to 23.7%) and included or associated to crystals of Py; Au2, enriched in Te (1.1 to 17.2%) and included in Qz4. The study of quartz crystals by SEM-CL provided important morphological and textural information for understanding of the hydrothermal processes that acted in the mineralized area of the São Jorge gold deposit, allowing the application of this methodology in studies of quartz of other hydrothermal deposits.

Keywords: SEM. Cathodoluminescence. Quartz. Gold. Tapajós.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 1		
Figura 1.1	Mapa de localização da área de estudo	3
Capítulo 3		
Figura 3.1	Cráton Amazônico	8
Figura 3.2	Mapa geológico da área do Granito São Jorge, com destaque para o depósito SJ. Modificado de Lamarão <i>et al.</i> 2002	10
Capítulo 4 - Artigo		
Figura 1	(A) Províncias Geocronológicas do Cráton Amazônico (Tassinari & Macambira 2004); (B) Mapa geológico da região de Vila Riozinho e do Granito São Jorge. (Modificado de Lamarão <i>et al.</i> 2002)	17
Figura 2	Imagens macroscópicas de amostras dos furos de sondagem do GSJJ, correspondentes às associações minerais de Borges <i>et al.</i> (2009)	19
Figura 3	Fotomicrografias mostrando feições mineralógico-texturais das diferentes associações minerais do GSJJ	20
Tabela 1	Lâminas polidas utilizadas neste estudo com as respectivas associações minerais atribuídas	21
Figura 4	Fotomicrografias de quartzo em luz transmitida (nicóis cruzados e paralelos)	23
Figura 5	(A-I) Tipos de quartzo identificados nas rochas do GSJJ através de imagens de MEV – CL	25
Figura 6	Imagens de ERE utilizadas nas análises de EDS. (A, B e C) Primeira geração de ouro (Au1) inclusa ou preenchendo fraturas na pirita	26
Figura 7	Segunda geração de ouro (Au2)	27
Tabela 2	Análises elementares médias por EDS (% peso) de fragmentos de ouro do depósito SJ	28
Figura 8	Esquema de alteração e evolução do quartzo em CL	31
Tabela 3	Relação entre tipos de quartzo e associações minerais identificadas na área do depósito SJ	32
Figura 9	Diagramas composicionais mostrando as relações entre conteúdos de Au, Ag e Te (% em peso) das gerações Au1 e Au2	34

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	2
1.3 JUSTIFICATIVA	2
1.4 OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 2 - MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	5
2.2 PETROGRAFIA.....	5
2.3 MICROANÁLISES.....	6
CAPÍTULO 3 - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	7
3.1 PROVÍNCIAS GEOCRONOLÓGICAS DO CRÁTON AMAZÔNICO	7
3.2 PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS	7
3.2.1 Domínio Tapajós.....	8
3.2.2 Geologia da região de Vila Riozinho.....	10
3.2.2.1 Formação Vila Riozinho.....	10
3.2.2.2 Granito São Jorge	10
3.2.2.3 Granito São Jorge Antigo	11
3.2.2.4 Granito São Jorge Jovem.....	11
3.2.2.5 Formação Moraes Almeida	12
3.2.2.6 Suíte Maloquinha.....	12
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	13
Artigo submetido ao <i>Brazilian Journal of Geology</i> : “ QUARTZO MAGMÁTICO E HIDROTHERMAL DO DEPÓSITO SÃO JORGE, PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS, PARÁ: IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS ”.	
RESUMO.....	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUÇÃO.....	15
CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	16

GRANITO SÃO JORGE.....	18
Aspectos Petrográficos.....	18
METODOLOGIA.....	21
Aplicações de MEV-CL em Quartzo.....	22
ANÁLISE MORFOLÓGICA DE QUARTZO.....	23
Estudo por Luz Transmitida.....	23
Estudo por Catodoluminescência.....	24
ANÁLISES QUÍMICAS DO OURO POR EDS.....	26
DISCUSSÕES.....	29
Texturas em CL.....	29
Alteração e Evolução do Quartzo.....	30
Caracterização Química do Ouro.....	33
CONCLUSÕES.....	35
AGRADECIMENTOS.....	35
REFERÊNCIAS.....	36
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
REFERÊNCIAS.....	42

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O Granito São Jorge (GSJ), localizado no município de Vila Riozinho, sudoeste do estado do Pará, está inserido no contexto da Província Aurífera do Tapajós (Faraco *et al.* 1997), a qual ocupa parte das províncias geocronológicas Ventuari-Tapajós e Amazônia Central (Tassinari & Macambira 1999, 2004). O GSJ é composto pelos granitos São Jorge Antigo (GSJA), com idades de cristalização de 1981 ± 9 Ma e 1981 ± 2 Ma, e São Jorge Jovem (GSJJ), intrusivo no anterior e com idade de 1891 ± 3 Ma (Lamarão *et al.* 2002, 2005). O depósito de ouro São Jorge foi alvo de intensa exploração em meados de 1990 pela empresa Rio Tinto Desenvolvimento Minerais Ltda (RTDM). Está hospedado em anfibólio-biotita-monzogranitos hidrotermalizados em diferentes intensidades que constituem, juntamente com biotita-leucomonzogranitos, o GSJJ.

Na área do depósito São Jorge, Borges *et al.* (2009) definiram quatro associações minerais que representam os diferentes estágios de evolução de suas rochas: Associação 1, formada no estágio magmático, corresponde às rochas preservadas; a Associação 2 representa o estágio de alteração pós-magmática precoce, com rochas modificadas e intensa saussuritização do plagioclásio; a Associação 3 é representada por rochas hidrotermalizadas e a Associação 4 por rochas hidrotermalizadas e mineralizadas. Nos furos FSJ-02 e FSJ-06, as rochas do GSJJ encontram-se intensamente hidrotermalizadas e com mineralizações de sulfetos (pirita, calcopirita, esfalerita e galena) e ouro. No furo FSJ-04, também mostram-se parcialmente hidrotermalizadas e mineralizadas, enquanto as rochas do furo FSJ-09 foram pouco afetadas pelos processos hidrotermais e, conseqüentemente, apresentam rara ou nenhuma mineralização associada.

O estudo morfológico e composicional de quartzo em rochas ígneas utilizando microscopia eletrônica de varredura-catodoluminescência (MEV-CL) tem se tornado uma metodologia complementar importante para o entendimento da história de cristalização e das condições envolvidas durante a formação deste mineral (D'Lemos *et al.* 1997; Müller *et al.* 2000, 2005; Landtwing & Pettke 2005; Wiebe *et al.* 2007; Breiter & Müller 2009; Larsen *et al.* 2009). Zoneamentos composicionais, defeitos intracristalinos, reabsorções, alterações, dilatações de cristais e fraturas preenchidas, são feições texturais importantes que podem ser observadas apenas com o auxílio de MEV-CL (Loomis & Welber 1982; Hogan 1993; Müller *et al.* 2002, 2005; Rusk & Reed 2002; Rusk *et al.* 2008; Slaby *et al.* 2008). A CL também tem sido utilizada para distinguir diferentes gerações de quartzo dentro de uma mesma unidade

magmática, podendo revelar diferentes processos magmáticos envolvidos, como a história da evolução e cristalização de magmas, relações entre cristais-inclusões fluidas, estágios de deformação e alteração, além de possibilitar a identificação de quartzo hidrotermal dentro de um depósito mineral e sua relação com os processos metalogenéticos (Rusk & Reed 2002; Müller *et al.* 2005; Rusk *et al.* 2006, 2008; Larsen *et al.* 2009; Vasyukova *et al.* 2013; Lamarão *et al.* 2013, 2014).

Nesse contexto, o principal objetivo desse estudo é estabelecer a evolução morfológica e textural de cristais de quartzo presentes nas rochas do GSJJ (área do depósito São Jorge) através de MEV-CL, e sua correlação com a intensidade da alteração hidrotermal, as gerações de ouro quimicamente distintas (análises por EDS-*Energy Dispersive Spectroscopy*) e os principais sulfetos associados (pirita e esfalerita).

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O depósito São Jorge (SJ) está localizado no município de Vila Riozinho, sudoeste do Estado do Pará, na porção central da Província Aurífera do Tapajós e dista cerca de 300 km a sul da cidade de Itaituba, Pará. A região de Vila Riozinho engloba as localidades de Jardim do Ouro, Moraes Almeida e Vila Riozinho. Sua principal via de acesso é a rodovia Cuiabá-Santarém (BR-163) que a secciona de norte a sul, além da rodovia Transgarimpeira que interliga as duas primeiras localidades. A Figura 1.1 mostra o mapa de localização da região de Vila Riozinho e da área do depósito São Jorge.

1.3 JUSTIFICATIVA

O uso de MEV-CL no estudo morfológico e composicional de quartzo vem crescendo nos últimos anos, tendo em vista cristais de quartzo serem excelentes marcadores de processos magmático-hidrotermais, metamórficos e sedimentares, sendo essas informações preservadas através de suas heterogeneidades e zoneamentos composicionais internos (Müller 2000; Boggs *et al.* 2001; Jacamon & Larsen 2009; Larsen *et al.* 2009). As texturas exibidas por cristais de quartzo em imagens de CL revelam detalhes que podem ser usados para determinar, por exemplo, a cronologia relativa de múltiplas gerações de quartzo e veios mineralizados coexistentes, identificar populações de inclusões sólidas e fluidas, correlacionar diferentes rochas de uma mesma unidade magmática, mostrar a evolução magmática de um corpo granítico com base nos tipos morfológicos de quartzo, etc. (Wilkinson *et al.* 1999; Rusk & Reed 2002; Rusk *et al.* 2008). No Brasil, o estudo de cristais de quartzo por MEV-CL ainda é muito pouco explorado. A Linha de Pesquisa em Quartzo e Zircão (LPQZ), ligada ao Grupo de

Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), vem realizando nos últimos anos estudos de MEV-CL em cristais de quartzo magmático-hidrotermal e fazendo interpretações petrológicas e metalogenéticas importantes com a utilização desta ferramenta (Lamarão *et al.* 2007, 2012, 2013, 2014).

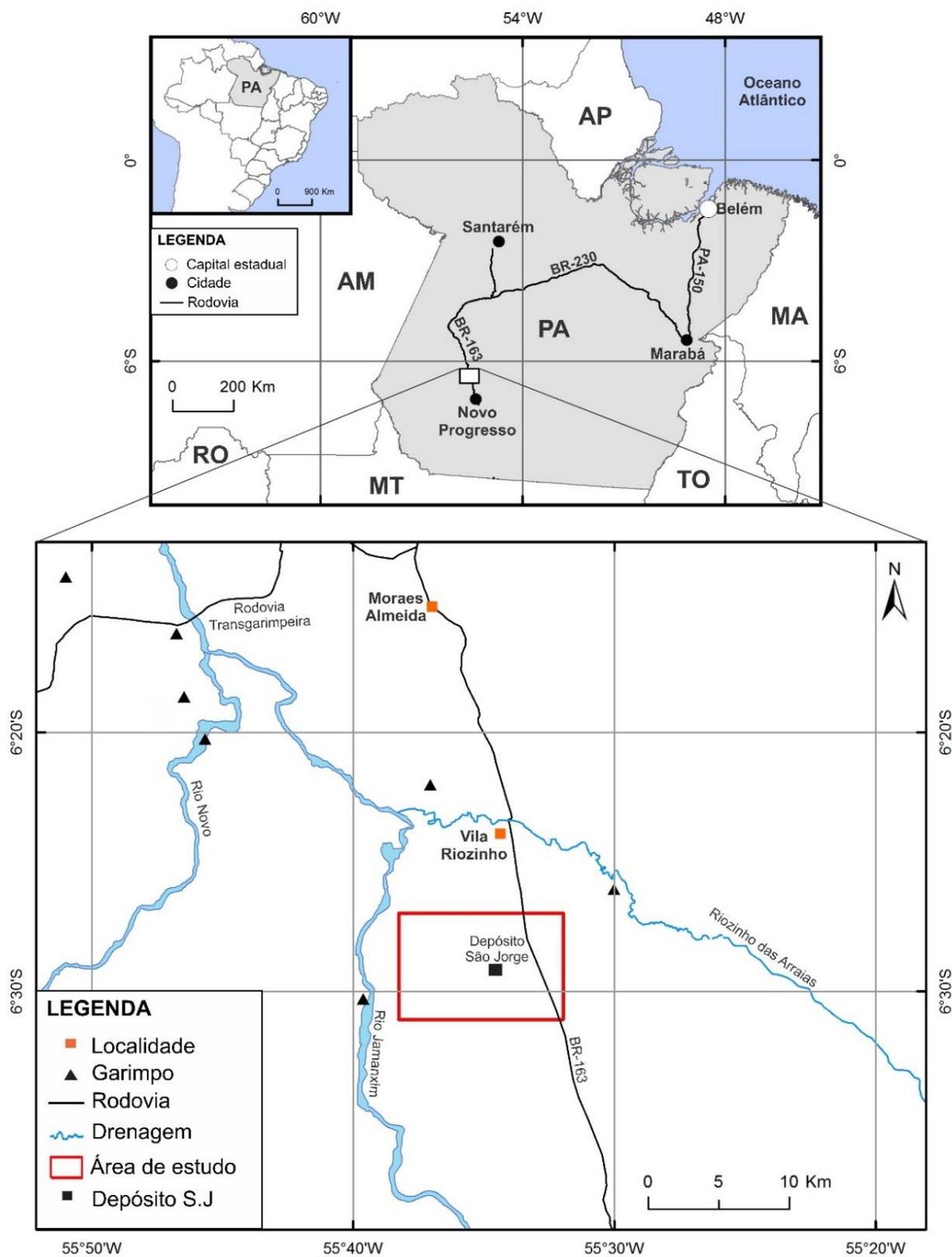


Figura 1.1 Mapa de localização da área de estudo.

1.4 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo correlacionar a alteração hidrotermal e a mineralização aurífera com a evolução textural e morfológica de cristais de quartzo magmáticos e hidrotermais do GSJJ, hospedeiro de mineralizações de ouro do depósito SJ, Província Aurífera do Tapajós. Especificamente, o trabalho teve como objetivo:

- 1- Caracterizar petrograficamente cristais de quartzo dos furos de sondagem FSJ-02, FSJ-04, FSJ-06 e FSJ-09 por microscopia de luz transmitida;
- 2- Aplicar a ferramenta MEV-CL na caracterização desses cristais identificando suas principais variações texturais e morfológicas;
- 3- Propor um modelo de evolução morfológica do quartzo utilizando informações obtidas por imagens de CL, as relações entre tipos de alterações da rocha, as zonas mineralizadas e estéreis, e o tipo de quartzo associado;
- 4- Caracterizar quimicamente as partículas de ouro presentes na zona mineralizada do depósito e identificar suas associações paragenéticas através de imagens de elétrons retroespalhados (ERE) e análises de espectroscopia por dispersão de energia (EDS);

CAPÍTULO 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Consistiu no levantamento bibliográfico referente à geologia da região estudada e da Província Aurífera do Tapajós, incluindo o Granito São Jorge e similares. Foram utilizados ainda artigos e livros relacionados à mineralizações em granitos:

- 1- Dissertações e publicações versando sobre a geologia e a geoquímica do corpo estudado (Lamarão *et al.* 2002, 2005);
- 2- Livros e apostilas envolvendo princípios básicos e aplicações em MEV (Reed 1996; Friel 2003);
- 3- Publicações abordando o estudo morfológico e composicional de quartzo através de MEV-CL (Wilkinson *et al.* 1999; Müller 2000; Rusk & Reed 2002; Rusk *et al.* 2006, 2008; Breiter & Muller 2009).

2.2 PETROGRAFIA

Quarenta e sete lâminas polidas foram confeccionadas a partir de amostras dos testemunhos de sondagem dos furos FSJ-02, FSJ-04, FSJ-06 e FSJ-09 do GSJJ (Tabela 1). A petrografia convencional foi realizada por luz transmitida, utilizando-se um microscópio petrográfico Leica DM 2500 P com câmera acoplada, pertencente ao Laboratório de Petrografia do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) do IG-UFPA. O objetivo foi identificar as associações minerais definidas por Borges *et al.* (2009) para a área do depósito SJ e os tipos de quartzo presentes em cada uma delas. Tais associações englobam desde as rochas magmáticas estéreis até aquelas alteradas hidrotermalmente e mineralizadas. Cristais de quartzo representativos de cada associação mineral foram selecionados e fotografados para os estudos de MEV-CL.

2.3 MICROANÁLISES

As análises de quartzo por MEV-CL foram realizadas no Laboratório de Microanálises do IG-UFGA. O MEV utilizado foi um LEO-ZEISS 1430 com sistema de Mono-CL da Gatan e detector de EDS Sirius-SD acoplados. As condições de operação para o imageamento de quartzo em CL foram: corrente do feixe de elétrons = 90 μ a, voltagem de aceleração de 10 kV e distância de trabalho de 13 mm. Para imagens de elétrons retroespalhados (ERE) e análises semiquantitativas de EDS dos minerais acessórios, incluindo sulfetos e ouro, as condições de análises foram: corrente do feixe de elétrons = 90 μ a, voltagem de aceleração constante = 20 kV e distância de trabalho = 15 mm. As lâminas polidas foram metalizadas com carbono e os elementos analisados foram O, Si, Fe, Cu, Au, Bi, Te, Ag, As, Ba e Zn. As concentrações de elementos traços no quartzo ficam abaixo dos limites de detecção do equipamento. Para as análises por EDS, utilizou-se o padrão ZAF ($Z = n^{\circ}$ atômico, $A =$ absorção atômica e $F =$ fluorescência de Raios X) que já vem instalado com o programa do MEV e faz correções entre pico e *background* do elemento.

CAPÍTULO 3 - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1 PROVÍNCIAS GEOCRONOLÓGICAS DO CRÁTON AMAZÔNICO

O Cráton Amazônico, formado durante os Éons Arqueano e Proterozóico, ocupa uma área de aproximadamente 4.500.000 km². Abrange grande parte do norte do Brasil, Guiana Francesa, Guiana, Suriname, Venezuela, Colômbia e Bolívia. É limitado a leste, a sul e a sudeste por unidades formadas durante o Ciclo Orogênico Brasileiro, respectivamente, Grupo Baixo Araguaia e Grupos Alto Paraguai, Cuiabá e Corumbá. Representa uma das principais unidades tectônicas da plataforma Sul-Americana, sendo formado pelos Escudos das Guianas e do Brasil Central, separados pelas Bacias Paleozoicas do Amazonas e Solimões. Tassinari & Macambira (1999, 2004) subdividiram o Cráton Amazônico em seis províncias geocronológicas (Figura 3.1): 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).

3.2 PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS

A Província Aurífera do Tapajós–PAT (Faraco *et al.* 1997) está localizada a sudoeste do Estado do Pará, no limite com o Estado do Amazonas, e abrange uma área de 140.000 km² no Cráton Amazônico. Ela é composta predominantemente por rochas plutônicas e vulcânicas paleoproterozoicas, intermediárias a félsicas, de afinidades cálcico-alcalina e alcalina (Klein & Vasquez 2000; Vasquez *et al.* 2002; Lamarão *et al.* 2002; Lamarão & Dall'Agnol 2002). A PAT representa uma das maiores províncias metalogenéticas do Brasil e ocupa parte das províncias geocronológicas Ventuari-Tapajós e Amazônia Central. Santos *et al.* (2000) redefiniram todas as províncias do cráton, com base em limites geográficos e idades U–Pb em zircão (2,10 - 1,87 Ga) obtidas para algumas rochas dessa região, das quais a Província Ventuari-Tapajós passou a ser chamada de Província Tapajós-Parima. Posteriormente, Santos *et al.* (2001) subdividiram a Província Tapajós-Parima em 4 domínios: Parima, Uaimiri, Tapajós e Alta Floresta.

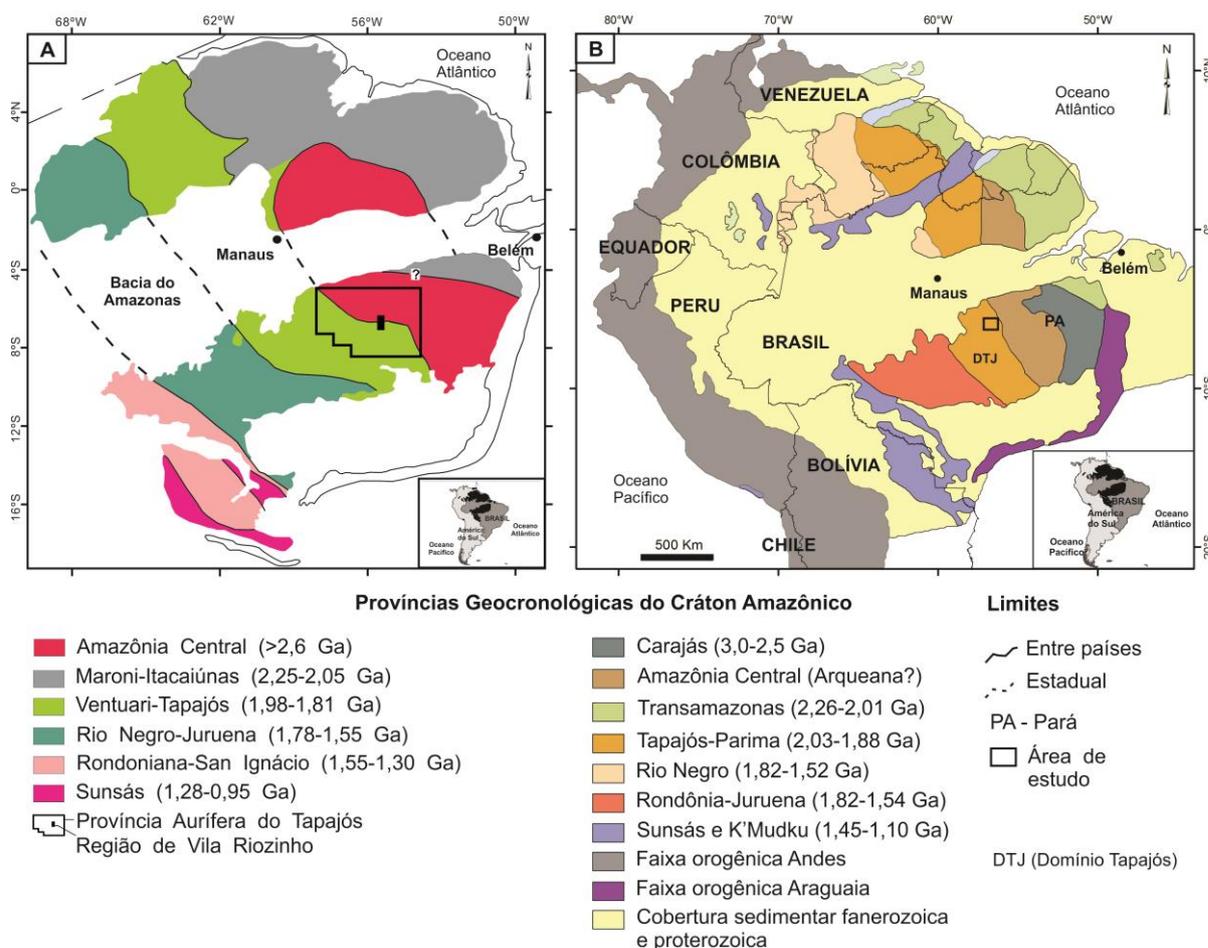


Figura 3.1 - Cráton Amazônico. (A) Mapa das Províncias Geocronológicas segundo Tassinari & Macambira (2004). (B) Mapa das Províncias Geocronológicas redefinidas por Santos *et al.* (2006).

3.2.1 Domínio Tapajós

A área de estudo está inserida no Domínio Tapajós (Santos *et al.* 2006, Figura 3.1 B), o qual apresenta as melhores informações sobre a evolução geológica e metalogenética dos depósitos de ouro da PAT (Santos *et al.* 2001). Este domínio é o maior segmento da Província Tapajós–Parima, apresenta orientação NW–SE com suas intrusões ígneas e sequências vulcânicas controladas pelas principais falhas e zonas de cisalhamento. Neste domínio ocorrem rochas metavulcano-sedimentares do Grupo Jacareacanga (Ferreira 2000) com zircão detrítico de idades em torno de 2,1 Ga, relacionadas a bacias de retroarco de fossa oceânica (Santos *et al.* 2000, 2001, 2004). Os ortognaisses do Complexo Cuiú-Cuiú (Pessoa *et al.* 1977; Melo *et al.* 1980; Ferreira *et al.* 2000; Klein & Vasquez 2000; Vasquez & Klein 2000; Almeida *et al.* 2001), as sequências vulcânicas da Formação Vila Riozinho (Lamarão & Dall’Agnol 2002; Lamarão *et al.* 2002, 2005) e granitoides eventualmente milonitizados da Suíte Creporizão (Ricci *et al.* 1999), estão relacionados ao magmatismo orogênico da região.

As rochas metavulcano-sedimentares do Grupo Jacareacanga ocorrem como faixas de orientações NW-SE a NNW-SSE e apresentam contato tectônico com as rochas do Complexo Cuiú-Cuiú, marcado por falhas e zonas de cisalhamento oblíquas e sinistrais. Esse conjunto de rochas foi intrudido por granitos orosirianos da Suíte Intrusiva Parauari e parcialmente recoberto por rochas sedimentares proterozóicas da Formação Buiuçu e fanerozóicas do Grupo Jatuarana (Ferreira 2000). O Complexo Cuiú-Cuiú representa o embasamento gnáissico-migmatítico do Domínio Tapajós. Nele ocorrem rochas metamórficas com orientação segundo o trend regional NW-SE, associadas com granodioritos a tonalitos cálcico-alcálicos, e pequenas ocorrências de monzogranitos e dioritos subordinados (Klein *et al.* 2001; Vasquez *et al.* 2008). Santos *et al.* (2000, 2001) obtiveram idades entre 2033 ± 7 e 2005 ± 7 Ma (U-Pb em zircão) para ortognaisses e granitoides deste complexo.

Com base nas informações geológicas contidas no Domínio Tapajós, a proposta de evolução da Província Tapajós-Parima envolveu a acreção de sucessivos arcos magmáticos (Cuiú-Cuiú, Jamanxim, Creporizão, Tropas e Parauari), seguido pelo magmatismo alcalino anorogênico Maloquinha (Santos *et al.* 2000, 2001; Santos 2004). Porém, Vasquez *et al.* (2002) sugerem que a evolução desta província se deu apenas com a colisão do Arco Cuiú-Cuiú/Anauá, seguido de uma sucessão de eventos magmáticos pós-colisionais transcorrentes e extensionais.

3.2.2 Geologia da região de Vila Riozinho

3.2.2.1 Formação Vila Riozinho

É formada por andesitos basálticos, traquiandesitos basálticos, traquitos e riolitos que afloram em áreas arrasadas ao longo do rio Jamanxim e às proximidades de Vila Riozinho. Datações Pb-Pb em zircão em rochas traquíticas forneceram idades de 2000 ± 4 e 1998 ± 3 Ma, interpretadas como idades de cristalização (Lamarão *et al.* 2002, 2005).

3.2.2.2 Granito São Jorge

O Granito São Jorge (GSJ) é um batólito irregular que ocorre nos arredores e a sul de Vila Riozinho (Figura 3.2). É composto pelos granitos São Jorge Antigo e São Jorge Jovem, ambos com características petrográficas e texturais similares, porém idades e assinaturas geoquímicas contrastantes (Lamarão *et al.* 2002, 2008).

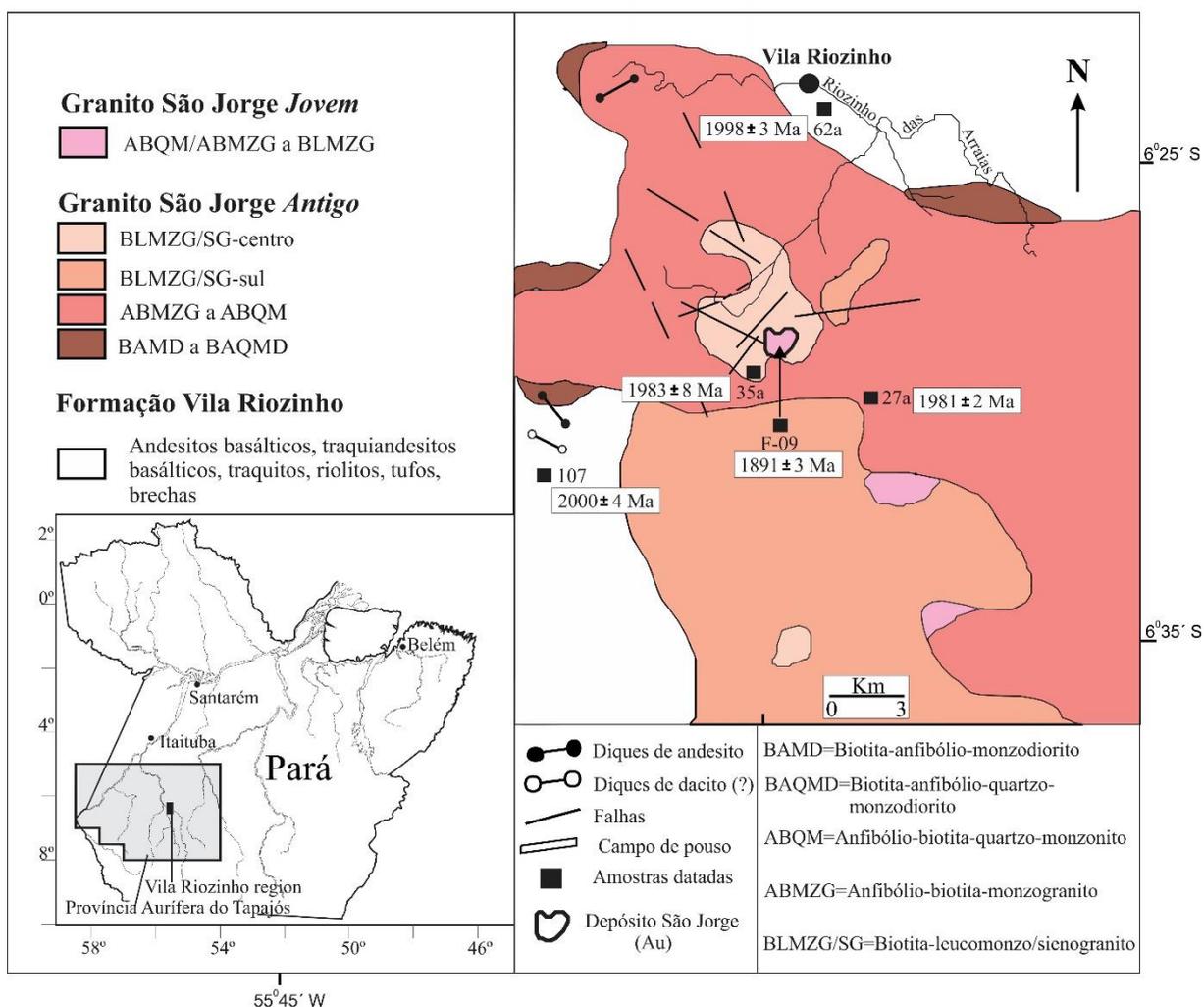


Figura 3.2 - Mapa geológico da área do Granito São Jorge, com destaque para o depósito SJ. Modificado de Lamarão *et al.* (2008).

3.2.2.3 Granito São Jorge Antigo

O Granito São Jorge Antigo (GSJA) é um batólito irregular, composicionalmente zonado, formado por rochas maciças isotrópicas acinzentadas, contendo cristais médios a grossos de plagioclásio e feldspato alcalino, cristais médios a finos de quartzo, anfibólio e biotita, além de finas concentrações de minerais opacos. Os constituintes essenciais são plagioclásio, feldspato alcalino e quartzo, enquanto anfibólio e biotita aparecem como minerais varietais. Os minerais acessórios são representados por zircão, apatita, titanita, allanita e opacos. Epidoto, clorita, titanita e sericita são as principais fases secundárias (Lamarão *et al.* 2002, 2008). O GSJA constitui uma série expandida que varia de biotita-anfibólio-monozodiorito a quartzo-monozodiorito (BAMD a BAQMD) aflorantes nas bordas NE, NW e W, anfibólio-biotita-monzogranito (dominantes) a quartzo-monzonito (ABMZG a ABQM) ocorrendo na porção intermediária a central, e anfibólio-biotita-quartzo-sienito (ABQS) e biotita-leucomonzo/sienogranito (BLMZG/SG) ocorrentes na parte central do corpo. Datações Pb-Pb em zircão em monzogranito forneceram idades de 1981 ± 2 e 1983 ± 8 Ma, consideradas idades de cristalização. Rochas vulcânicas da Formação Vila Riozinho contornam o GSJA e representam suas encaixantes. O GSJA é metaluminoso a ligeiramente peraluminoso, mostra caráter oxidado, características de formação em ambiente de arco magmático e afinidades geoquímicas com granitos Tipo-I (Lamarão *et al.* 2002).

3.2.2.4 Granito São Jorge Jovem

Na região de Vila Riozinho, o Granito São Jorge Jovem (GSJJ) aflora na forma de blocos hidrotermalizados de coloração avermelhada, enquanto na área do depósito SJ, foi identificado somente em testemunhos de sondagem. Segundo Lamarão *et al.* (2002), dominam monzogranitos e leucomonzogranitos hospedeiros da mineralização aurífera do depósito. É formado por anfibólio-biotita-monzogranito a quartzo-monzonito (ABMZG a ABQM) e biotita-leucomonzogranito (BLMZG) mineralógica e texturalmente similares às rochas equivalentes do GSJA. Datação Pb-Pb em zircão em leucomonzogranito revelou idade de cristalização de 1891 ± 3 Ma.

3.2.2.5 Formação Moraes Almeida

A Formação Moraes Almeida é formada predominantemente por ignimbritos soldados, ricos em cristais e fragmentos de cristais dispersos em matriz afanítica marrom avermelhada, além de derrames riolíticos e rochas traquíticas mais localizadas. Ocorrem em áreas arrasadas ou como pequenos morros abaulados nos arredores de Moraes Almeida. Datações geocronológicas por evaporação de Pb em zircão revelaram idades de 1890 ± 6 Ma para os riolitos, 1881 ± 4 Ma para os traquitos e 1875 ± 4 Ma para os ignimbritos, interpretadas como idades de cristalização (Lamarão *et al.* 2002). Os dados petrográficos, geoquímicos e geocronológicos sugerem que essas rochas estão relacionadas ao mesmo evento vulcânico atribuído ao Grupo Iriri (Vasquez *et al.* 2008).

3.2.2.6 Suíte Maloquinha

A Suíte Maloquinha é composta por leucosienogranitos de granulação média a grossa, com leucomonzogranitos subordinados, contendo biotita como principal fase máfica; aflora como pequenas serras alongadas e morros abaulados associados às rochas vulcânicas da Formação Moraes Almeida. Datação obtida pelo método de evaporação de Pb em zircão forneceu idade de 1880 ± 9 Ma, considerada a idade de cristalização (Lamarão *et al.* 2002).

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

Artigo submetido ao *Brazilian Journal of Geology*:

QUARTZO MAGMÁTICO E HIDROTERMAL DO DEPÓSITO DE OURO SÃO JORGE, PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS-PA: PETROGRAFIA, MEV-CL E IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS.

Magmatic and hydrothermal quartz of the São Jorge gold deposit, Tapajós Gold Province-PA: Petrography, SEM-CL and metallogenetic implications.

Aldemir de Melo Sotero^{1,2*}; Claudio Nery Lamarão^{1, 2}; Gisele Tavares Marques²; Paulo Roberto Soares Rodrigues^{1,2}.

¹ Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém (PA), Brasil. *E-mail: aldemir.sotero@hotmail.com*

² Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitóides, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém (PA), Brasil. *E-mail: lamarao@ufpa.br; gisageo15@yahoo.com.br; psoares29@hotmail.com*

*Autor correspondente

Avenida Augusto Corrêa 1, CEP 66075-100, Belém (PA), Brasil.

RESUMO

Estudos em cristais de quartzo presentes nas associações minerais propostas por Borges *et al.* (2009) para a área do depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, sudoeste do estado do Pará, identificaram quatro tipos morfológico-texturais (Qz1, Qz2, Qz3 e Qz4) com base em imagens de microscopia eletrônica de varredura-catodoluminescência (MEV-CL). Nas rochas mais preservadas do Granito São Jorge Jovem, ricas em anfibólio e biotita (associações 1 e 2), dominam cristais anédricos de quartzo magmático com luminescência alta a moderada (Qz1). Nas rochas parcialmente alteradas (associações 2 e 3), fluidos pós-magmáticos a hidrotermais afetaram o granito e percolaram fraturas do Qz1 e cristalizaram Qz2 não luminescente (escuro). Nas rochas mais intensamente alteradas (associação 4), sucessivos processos de alteração, dissolução e recristalização deram origem a cristais de quartzo zonados subédricos (Qz3) e euédricos (Qz4). Imagens por elétrons retroespalhados (ERE) e análises semiquantitativas por espectroscopia por dispersão de energia (EDS) identificaram duas gerações de ouro: Au1, enriquecido em Ag (4,3 a 23,7%) e associado a cristais de pirita; Au2, enriquecido em Te (1,1 a 17,2%) e incluso ou associado ao Qz4. O estudo de MEV-CL forneceu informações importantes que foram preservadas na estrutura do quartzo. A evolução morfológico-textural deste mineral em diferentes estágios evidencia a ação gradativa do hidrotermalismo nas rochas e nas associações minerais do depósito São Jorge. A mineralização aurífera do depósito foi caracterizada quimicamente (EDS) e parageneticamente (pirita, esfalerita e Qz4), podendo ser dividida em gerações ou eventos mineralizantes distintos. A eficiência da metodologia utilizada neste estudo foi comprovada, permitindo sua aplicação em estudos de outros depósitos hidrotermais.

Palavras-chave: Tapajós. MEV. Catodoluminescência. Quartzo. Ouro.

ABSTRACT

Studies in crystals of quartz present in the mineral associations proposed by Borges *et al.* (2009) to the area of the São Jorge gold deposit, Tapajós Gold Province, southwest of the Pará state, identified four morphological and textural types (Qz1, Qz2, Qz3 and Qz4) by scanning electron microscopy-cathodoluminescence images. In the more preserved rocks of the Younger São Jorge Jovem granite, rich in amphibole and biotite (associations 1 and 2), anhedral crystals of magmatic quartz with high to moderate luminescence (Qz1) dominate. In the partly altered rocks (associations 2 and 3), post-magmatic to hydrothermal fluids affected the granite, and filled fractures in Qz1 and crystallized not luminescent (dark) Qz2. In the most intensely altered rocks (association 4), successive alteration, dissolution and recrystallization processes gave rise to typically hydrothermal zoned, subhedral (Qz3) and euhedral (Qz4) quartz crystals. Images by backscattered electrons and semiquantitative analysis by energy dispersive spectroscopy identified two generations of gold: Au1, enriched in Ag (4.3 to 23.7%) and associated to pyrite crystals; Au2, enriched in Te (1.1 to 17.2%) and included or associated to Qz4. The SEM-CL study provided important information that was preserved in the quartz structure. The morphological and textural evolution of this mineral in different stages shows the gradual action of the hydrothermalism in the rocks and minerals associations of São Jorge deposit. Gold mineralization of the deposit was chemically (EDS) and paragenetically (pyrite, sphalerite and Qz4) characterized, and it can be divided into different generations or mineralizing events. The effectiveness of the methodology used in this study was established, allowing its application in studies of other hydrothermal deposits.

Keywords: Tapajós. SEM. Cathodoluminescence. Quartz. Gold.

INTRODUÇÃO

O Granito São Jorge (GSJ), localizado no município de Vila Riozinho, sudoeste do estado do Pará, está inserido no contexto da Província Aurífera do Tapajós (Faraco *et al.* 1997), a qual ocupa parte das províncias geocronológicas Ventuari-Tapajós e Amazônia Central (Tassinari & Macambira 1999, 2004). O GSJ é composto pelos granitos São Jorge Antigo (GSJA), com idades de cristalização de 1981 ± 9 Ma e 1981 ± 2 Ma, e São Jorge Jovem (GSJJ), intrusivo no anterior e com idade de 1891 ± 3 Ma (Lamarão *et al.* 2002, 2005). O depósito de ouro São Jorge (SJ) está hospedado em anfibólio-biotita monzogranitos hidrotermalizados em diferentes intensidades, que constituem juntamente com biotita leucomonzogranitos, o GSJJ. O depósito SJ foi alvo de prospecção mineral em meados de 1990 pela empresa Rio Tinto Desenvolvidos Minerais Ltda (RTDM). Em 2013, a empresa mineradora Brazil Resources passou a deter os direitos econômicos sobre o depósito São Jorge e divulgou um relatório técnico com reserva estimada da ordem de 14,4 milhões de toneladas, com teor de 1,5 g/t Au, o equivalente a 715 mil onças de ouro. As reservas inferidas são de 28,1 milhões de toneladas com teor de 1,1 g/t Au, a um teor de corte de 0,3 g/t Au.

Na área do depósito SJ, Borges *et al.* (2009) definiram quatro associações minerais que representam os diferentes estágios de evolução de suas rochas, onde: a Associação 1, formada no estágio magmático, corresponde às rochas preservadas; a Associação 2 representa o estágio de alteração pós-magmática precoce, com rochas modificadas e intensa saussuritização do plagioclásio; a Associação 3 é representada por rochas hidrotermalizadas e a Associação 4 por rochas hidrotermalizadas e mineralizadas. Nos furos FSJ-02 e FSJ-06, as rochas do GSJJ encontram-se intensamente hidrotermalizadas e com mineralizações de sulfetos (pirita, calcopirita, esfalerita e galena) e ouro. No furo FSJ-04, também mostram-se parcialmente hidrotermalizadas e mineralizadas, enquanto as rochas do furo FSJ-09, pouco afetadas pelos processos hidrotermais, apresentam rara ou nenhuma mineralização associada.

O estudo morfológico e composicional de quartzo em rochas ígneas utilizando microscopia eletrônica de varredura-catodoluminescência (MEV-CL) tem se tornado uma metodologia complementar importante para o entendimento da história de cristalização e das condições envolvidas durante a formação deste mineral (D'Lemos *et al.* 1997; Müller *et al.* 2000, 2003, 2005; Landtwing & Pettke 2005; Wiebe *et al.* 2007; Breiter & Müller 2009; Larsen *et al.* 2009). Zoneamentos composicionais, defeitos intracristalinos, reabsorções, alterações, dilatações de cristais e fraturas preenchidas, são feições texturais importantes que podem ser observadas apenas com o auxílio de MEV-CL (Loomis & Welber 1982; Hogan 1993; Müller *et al.* 2000, 2002, 2005; Rusk & Reed 2002; Rusk *et al.* 2008; Slaby *et al.* 2008). A CL também tem sido utilizada para distinguir diferentes gerações de quartzo dentro de uma mesma unidade magmática, podendo revelar diferentes processos magmáticos envolvidos, como a história da evolução e cristalização de magmas, relações entre

cristais-inclusões fluidas, estágios de deformação e alteração, além de possibilitar a identificação de quartzo hidrotermal dentro de um depósito mineral e sua eventual relação aos processos metalogenéticos (Rusk & Reed 2002; Müller *et al.* 2005; Rusk *et al.* 2006, 2008; Larsen *et al.* 2009; Vasyukova *et al.* 2013; Lamarão *et al.* 2013, 2014).

Nesse contexto, o principal objetivo desse estudo é estabelecer a evolução morfológica e textural de cristais de quartzo presentes nas rochas do GSJJ (área do depósito São Jorge) através de MEV-CL, e sua correlação com a intensidade da alteração hidrotermal, as gerações de ouro quimicamente distintas (por EDS-*Energy Dispersive Spectroscopy*) e os principais sulfetos associados (pirita e esfalerita).

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Aurífera do Tapajós–PAT (Faraco *et al.* 1997; Juliani *et al.* 2002) está localizada a sudoeste do estado do Pará, no limite com o estado do Amazonas, e abrange uma área de aproximadamente 140.000 km² no Cráton Amazônico (Figura 1 A). Ocupa parte da província geocronológica Ventuari-Tapajós (Tassinari & Macambira 1999, 2004) e é constituída predominantemente por rochas plutônicas e vulcânicas paleoproterozoicas intermediárias a félsicas, de afinidades cálcico-alcalina e alcalina (Klein & Vasquez 2000; Vasquez *et al.* 2002; Lamarão *et al.* 2002; Lamarão & Dall’Agnol 2002).

O embasamento da PAT é formado principalmente por xistos pelíticos do Grupo Jacareacanga e ortognaisses tonalíticos e granodioríticos do Complexo Cuiú-Cuiú, além de granodioritos, tonalitos e pequenas ocorrências de monzogranitos e dioritos cálcico-alcalinos (Pessoa *et al.* 1977; Melo *et al.* 1980; Ferreira *et al.* 2000; Klein & Vasquez 2000; Vasquez & Klein 2000; Klein *et al.* 2001; Juliani *et al.* 2002; Vasquez *et al.* 2008). Santos *et al.* (2001) obtiveram idades U-Pb em zircão de 2033 ± 7 e 2011 ± 23 Ma para granodiorito e tonalito deste complexo. Sequências metavulcano-sedimentares do Grupo Jacareacanga, com idade em zircões detríticos variando de 2100 a 2875 Ma, são consideradas contemporâneas ao Complexo Cuiú-Cuiú e ambos representariam o estágio inicial de desenvolvimento de um arco magmático (Ferreira *et al.* 2000; Klein & Vasquez 2000; Santos *et al.* 2000; Klein *et al.* 2001).

Seguindo na sequência estratigráfica da província, ocorrem rochas vulcânicas de 2,0 Ga compostas por andesitos basálticos, traquiandesitos basálticos, traquitos e riolitos da Formação Vila Riozinho (Lamarão *et al.* 2002, 2005) e granitoides cálcico-alcalinos sin a tardi-tectônicos com 1,96 a 2,0 Ga pertencentes à Suíte Creporizão (Ricci *et al.* 1999; Santos *et al.* 2000; Lamarão *et al.* 2002). A Suíte Parauarí, com idade entre 1,89-1,87 Ga, representa a geração mais jovem de granitos cálcico-alcalinos pós-orogênicos da PAT (Klein & Vasquez 2000; Santos *et al.* 2000; Lamarão *et al.* 2002; Vasquez *et al.* 2002). Por volta de 1,88 Ga, um volumoso magmatismo granítico tipo A ocorreu na

PAT e foi agrupado nas Suítes Maloquinha e Caroçal. Sequências vulcânicas intermediárias a félsicas, com idades entre 1890 e 1875 Ma pertencentes às Formações Moraes Almeida e Bom Jardim, foram agrupadas no Grupo Iriri, do Supergrupo Uatumã (Klein & Vasquez 2000; Klein *et al.* 2001; Lamarão & Dall'Agnol 2002; Lamarão *et al.* 2002, 2005). Intrusões de corpos máficos a intermediários (Suítes Ingarana e Cachoeira Seca), além de diques máficos (Diabásio Crepori) e lamprófiros, completam o magmatismo da PAT (Quadros *et al.* 1999; Santos *et al.* 2001).

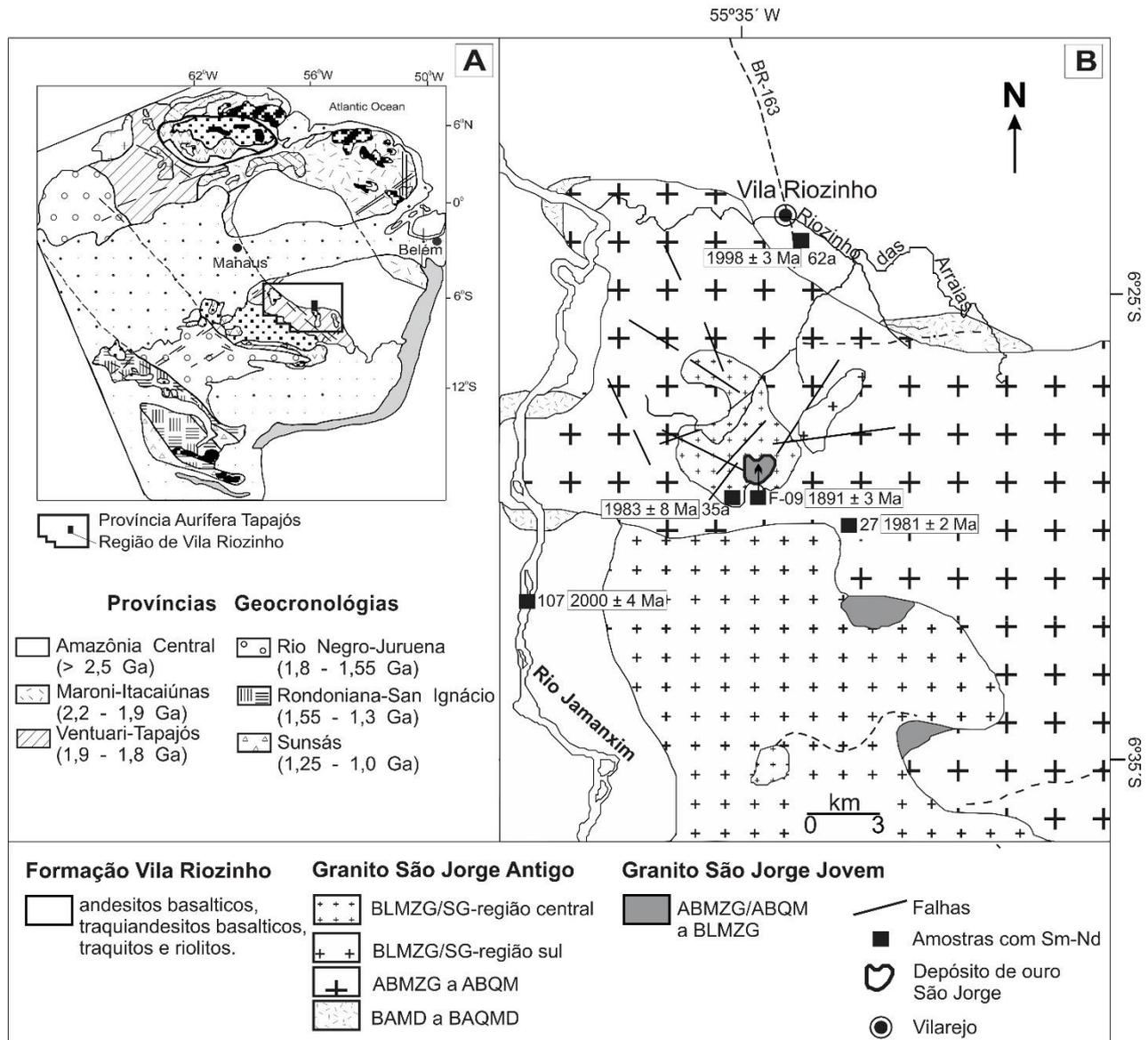


Figura 1 - (A) Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico (Tassinari & Macambira 2004); (B) Mapa geológico da região de Vila Riozinho e do Granito São Jorge (modificado de Lamarão *et al.* 2002). BAMD=biotita-anfibólio-monzodiorito, BAQMD=biotita-anfibólio-quartzo-monzodiorito, ABQM=anfibólio-biotita-quartzo-monzonito, ABMZG=anfibólio-biotita-monzogranito e BLMZG/SG=biotita-leucomonzogranito/sienogranito.

GRANITO SÃO JORGE

O Granito São Jorge (GSJ) está situado no município de Vila Riozinho, porção central da Província Aurífera do Tapajós, sudoeste do Estado do Pará. Ele é formado pelos granitos São Jorge Antigo (GSJA) e São Jorge Jovem (GSJJ). O GSJA é um batólito irregular, constituído por rochas maciças isotrópicas acinzentadas, representadas por biotita-anfibólio-monozodiorito a quartzo-monozodiorito (BAMD a BAQMD) aflorantes nas bordas NE, NW e W, anfibólio-biotita-monzogranito (dominantes) a quartzo-monzonito (ABMZG a ABQM) aflorantes nas porções mais centrais, anfibólio-biotita-quartzo-sienito (ABQS) e biotita-leucomonzogranito-sienogranitos (BLMG/SG) que ocorrem na parte central (Figura 1 B). A disposição das rochas mais máficas, aflorando nas bordas, e as mais félsicas, na parte central, sugere que o corpo é composicionalmente zonado. Mineralogicamente, o GSJA contém cristais médios a grossos de plagioclásio e feldspato potássico, cristais médios a finos de quartzo, anfibólio e biotita. As fases minerais acessórias dominantes são zircão, apatita, titanita, allanita e opacos. Epidoto, clorita, titanita e sericita são as principais fases secundárias. Datações Pb-Pb em zircão em ABMZG forneceram idades de 1981 ± 2 e 1983 ± 8 Ma, consideradas idades de cristalização (Lamarão *et al.* 2002, 2008).

O GSJJ aflora na porção sul do GSJ na forma de blocos hidrotermalizados de coloração avermelhada. Na área do depósito SJ, o GSJJ foi identificado por meio de testemunhos de sondagem. Segundo Lamarão *et al.* (2002), dominam anfibólio-biotita-monzogranitos a quartzo-monzonitos (ABMZG a ABQM) e biotita-leucomonzogranitos (BLMZG) hospedeiros da mineralização aurífera do depósito São Jorge. As rochas do GSJJ são mineralógica e texturalmente similares às rochas equivalentes do GSJA. Datação Pb-Pb em zircão em rochas leucomonzograníticas revelou idade de cristalização de 1891 ± 3 Ma para o GSJJ.

Aspectos Petrográficos

As descrições a seguir envolvem as quatro associações minerais propostas por Borges *et al.* (2009) para as rochas da área do depósito SJ, baseadas na intensidade da alteração hidrotermal atuante no corpo.

Associação 1: corresponde às rochas menos evoluídas, pouco alteradas e isentas de mineralização do GSJJ. A rocha é um anfibólio-biotita-monzogranito isotrópico, de granulação média a grossa, coloração rosada a cinza rosada, com textura granular ainda bem preservada (Figura 2 A). Em algumas porções ocorrem veios aplíticos, enclaves máficos e textura rapakivi. A composição mineralógica é representada essencialmente por feldspato alcalino, quartzo e plagioclásio (An₃₂₋₁₂) com zoneamento marcante e fraca saussuritização; biotita levemente cloritizada e actinolita compõem as principais fases varietais (Figuras 3 A-B). Os minerais acessórios comuns são opacos, titanita, zircão e apatita.

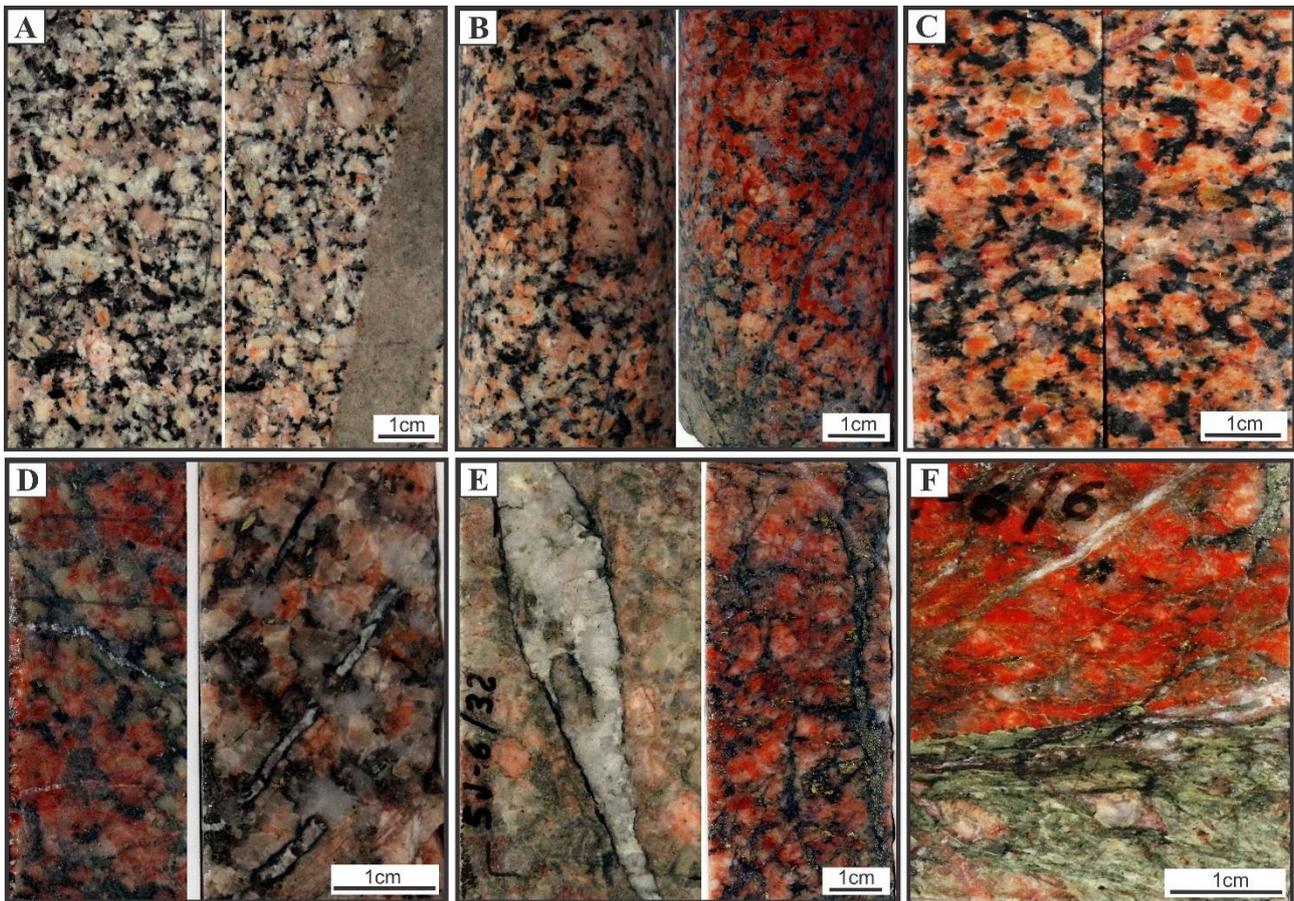


Figura 2 - Imagens macroscópicas de amostras dos furos de sondagem do GSJJ, correspondentes às associações minerais de Borges *et al.* (2009). (A) associação 1 - rocha granítica com textura ígnea preservada e presença de veios aplíticos de espessura centimétrica; (B e C) associação 2 - rocha pouco alterada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

Associação 2: a rocha apresenta indícios de alteração pós-magmática precoce e coloração mais avermelhada (Figuras 2 B-C). Algumas porções da rocha contêm fraturas e veios, porém com textura ígnea ainda preservada e sem mineralização associada. Biotita e anfibólio ainda estão presentes, porém o anfibólio ocorre pseudomorfisado (Figura 3 C) e parcialmente substituído por clorita, carbonatos, óxidos de Fe e Ti, titanita e epidoto; a biotita ocorre parcialmente cloritizada. O plagioclásio ocorre intensamente saussuritizado (Figura 3 D). Feldspato alcalino, com maclas albita-periclina, titanita e minerais opacos primários encontram-se ainda preservados.

Associação 3: representa porções de rochas hidrotermalizadas, com coloração avermelhada e pontos esverdeados (Figura 2 D). O plagioclásio ocorre intensamente saussuritizado e descalcificado, substituído por mica branca e carbonato. O anfibólio encontra-se totalmente substituído por clorita e epidoto, enquanto a biotita sofre alteração intensa para clorita (Figuras 3 E-F-G). O quartzo preenche veios e vênulas que cortam a rocha. Titanita, magnetita e ilmenita mostram corrosão e substituição por opacos. Esta associação representa o estágio de alteração propilítica e o início dos processos hidrotermais que geraram a mineralização no GSJJ.

Associação 4: corresponde à porção mais alterada do granito, com feições texturais e mineralógicas totalmente obliteradas; a rocha assume coloração rosa esverdeada a verde rosada, apresenta porções brechadas cortadas por veios (Figuras 2 E-F) e zonas mineralizadas em sulfetos e ouro. O plagioclásio original sofre intensa descalcificação, passa a apresentar composição albítica e ocorre impregnado por mica branca e carbonato (Figura 3 F). Esta associação representa o ápice da alteração hidrotermal, com intensa alteração fílica, caracterizada por conteúdos expressivos de mica branca, carbonato e sulfetos, principalmente pirita (Figuras 3 H-I). Os sulfetos ocorrem preenchendo fraturas ou associados a quartzo, clorita e carbonato. O ouro ocorre como finas inclusões em cristais de pirita, esfalerita e quartzo.

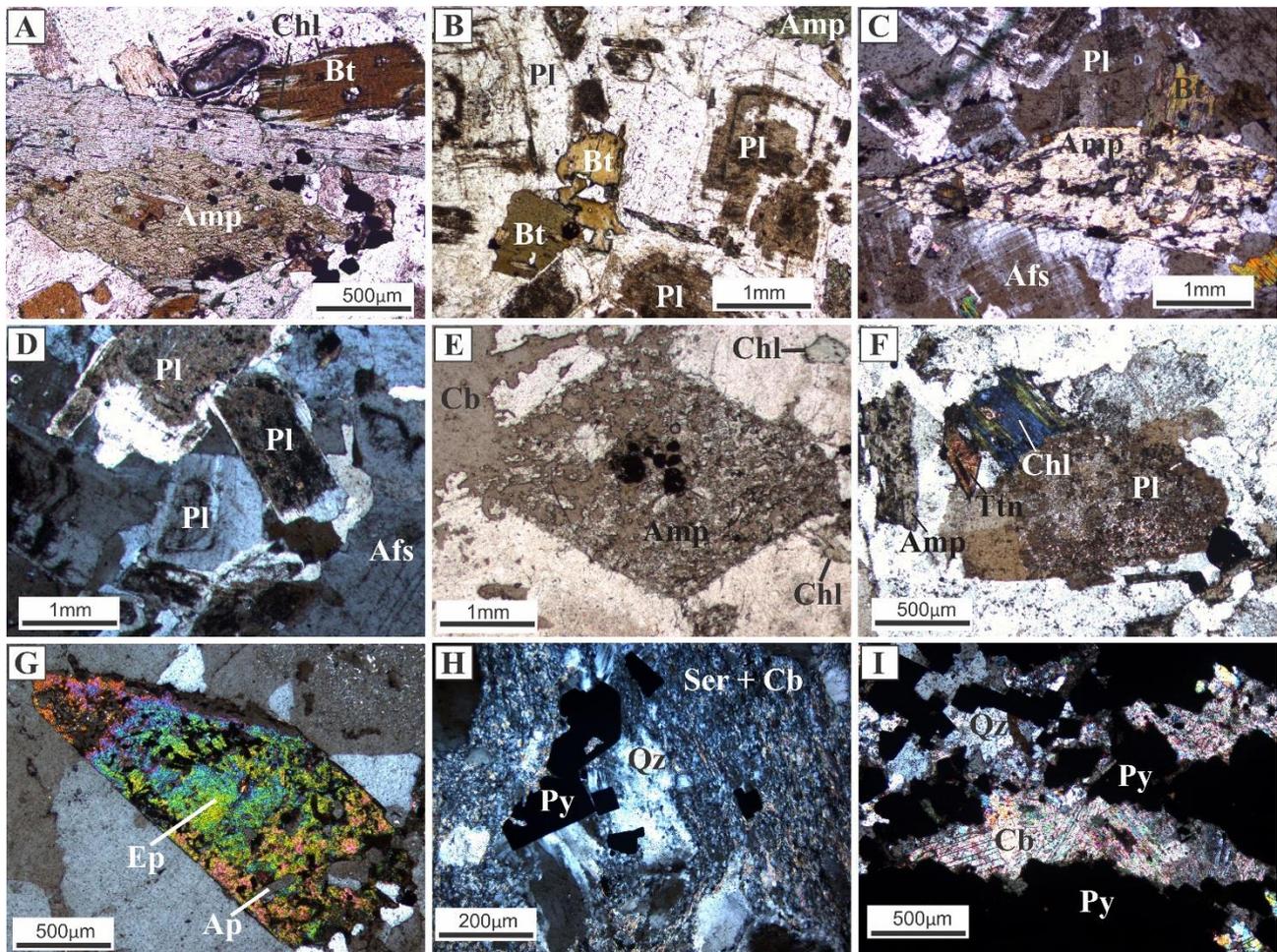


Figura 3 – Fotomicrografias mostrando feições mineralógico-texturais das diferentes associações minerais do GSJJ. (A e B) Associação 1. Cristais eudrícos a subédricos de hornblenda verde-clara, contendo inclusões de minerais opacos e apatita; biotita marrom levemente alterada para clorita e cristais de plagioclásio zonados associados à biotita e anfibólio. (C e D) Associação 2. Anfibólio pseudomorfisado associado a plagioclásio saussuritizado e feldspato alcalino. (E, F e G) Associação 3. Alteração propilítica, com anfibólio substituído por clorita, carbonato e epidoto; biotita cloritizada, plagioclásio sericitizado e titanita ainda presente. (H e I) Associação 4. Alteração fílica, com plagioclásio substituído por sericita e carbonato; cristais de pirita associados com quartzo e carbonato. Afs=feldspato alcalino, Amp=anfíbólio, Ap=apatita, Bt=biotita, Cb=carbonato, Chl=clorita, Ep=epidoto, Pl=plagioclásio, Py=pirita, Qz=quartzo e Ser=sericita. Abreviações segundo Whitney & Evans (2010).

METODOLOGIA

Foram utilizadas 47 lâminas polidas (Tabela 1) representativas das associações minerais 1, 2, 3 e 4, propostas por Borges *et al.* (2009), confeccionadas a partir dos testemunhos de sondagem dos furos FSJ-02, FSJ-04, FSJ-06 e FSJ-09, executados no GSJJ. Inicialmente foi realizado um estudo petrográfico por luz transmitida, com a obtenção de fotomicrografias dessas associações minerais e dos principais tipos de quartzo presentes nelas, utilizando-se um microscópio Leica DM 2500 P com câmera acoplada, pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Pará (IG-UFPA). As lâminas selecionadas foram metalizadas com carbono para imageamento de quartzo por elétrons retroespalhados (ERE), catodoluminescência CL e análises por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). O MEV utilizado foi um LEO-ZEISS 1430 do IG-UFPA com sistema de Mono-CL Gatan e detector de EDS Sirius-SD acoplados. As condições de operação para o imageamento de quartzo em CL foram: corrente do feixe de elétrons = 90 μ a, voltagem de aceleração de 10 KV e distância de trabalho de 13 mm. Para a obtenção de imagens de ERE e análises por EDS foram utilizadas corrente do feixe de elétrons = 90 μ a, voltagem de aceleração constante = 20 KV, distância de trabalho = 15 mm, tempo de análise = 30 s com 4000 a 5000 c/s para cada análise. Análises semiquantitativas por EDS foram realizadas para a identificação de partículas de ouro e sulfetos, além de outras fases acessórias. Os principais elementos analisados foram O, Si, Fe, Cu, Au, Bi, Te, Ag, As, Ba e Zn. As análises por EDS utilizaram o padrão ZAF ($Z = n^\circ$ atômico, $A =$ absorção atômica e $F =$ fluorescência de Raios X) para correções entre picos e *backgrounds* dos elementos.

Tabela 1 - Lâminas polidas utilizadas nesse estudo com as respectivas associações minerais atribuídas.

Associações minerais (Borges <i>et al.</i> 2009)	Lâminas polidas
1	FSJ-04-22, FSJ-04-25, FSJ-04-29, FSJ-04-38, FSJ-09-01, FSJ-09-08, FSJ-09-09, FSJ-09-10, FSJ-09-12, FSJ-09-13, FSJ-09-17.
2	FSJ-04-20, FSJ-04-43, FSJ-06-27, FSJ-06-34, FSJ-09-02, FSJ-09-03, FSJ-09-04, FSJ-09-11.
3	FSJ-02-05, FSJ-02-40, FSJ-02-41, FSJ-02-46, FSJ-04-11, FSJ-04-13, FSJ-04-31, FSJ-04-33, FSJ-06-03, FSJ-06-04, FSJ-06-26, FSJ-06-30, FSJ-09-05, FSJ-09-07.
4	FSJ-02-13, FSJ-02-22, FSJ-02-25, FSJ-02-31, FSJ-02-33, FSJ-02-36, FSJ-02-39, FSJ-02-42, FSJ-02-43, FSJ-02-45, FSJ-06-12, FSJ-06-16, FSJ-06-23, FSJ-06-25.

FSJ=Furo São Jorge

Aplicações de MEV-CL em Quartzo

Estudos de quartzo por MEV-CL com finalidades metalogenéticas são relativamente raros. Rusk & Reed (2002) utilizaram dados de MEV-CL e inclusões fluidas de veios mineralizados do depósito de cobre pórfiro de Butte-Montana. Os autores identificaram cristais de quartzo luminescentes associados a molibdenita e cristais de quartzo zonados associados a pirita. Texturas presentes no quartzo foram interpretadas como produto da variação da solubilidade de sílica em fluidos hidrotermais e da variação de temperatura e pressão relacionadas à mineralização da rocha hospedeira do depósito. Rusk *et al.* (2008), através de imagens de CL e de análises de LA-ICP-MS, observaram que depósitos de cobre pórfiro de alta temperatura (500-700 °C) apresentam cristais de quartzo com concentrações elevadas de Ti (200-450 ppm) em correlação positiva com a catodoluminescência; por outro lado, em depósitos epitermais de ouro e prata (100-300°C) o quartzo apresenta fraca luminescência e baixos conteúdos de Ti (≤ 200 ppm).

Lamarão *et al.* (2013) mostraram que o quartzo foi um excelente marcador da evolução magmática e das alterações hidrotermais que atuaram no Granito Antônio Vicente, Província Estanífera do Sul do Pará, e em *greisens* associados. Cinco tipos de quartzo foram identificados, sendo um magmático e quatro hidrotermais. A mineralização estanífera acompanha as rochas mais evoluídas e alteradas hidrotermalmente e os *greisens*, ocorrendo associada ou inclusa nos quartzos hidrotermais. Lamarão *et al.* (2014), utilizando imagens de MEV-CL, correlacionaram cristais de quartzo de diferentes unidades vulcânicas e plutônicas das províncias Aurífera do Tapajós e Estanífera do Xingu, cráton Amazônico, além de estabelecerem relações cronológicas entre diferentes eventos de mineralização em *greisens* da Província Estanífera de Pitinga, Amazonas, e em arenitos do Grupo Serra Grande, Bacia do Parnaíba, portadores de veios de opala laranja e quartzo.

ANÁLISE MORFOLÓGICA DE QUARTZO

Estudo por Luz Transmitida

Com base em aspectos morfológico-texturais e no aumento da alteração hidrotermal, foram individualizados três tipos principais de quartzo. O Tipo-1, dominante nas associações 1 e 2, representa o quartzo magmático; forma cristais anédricos médios a grossos com extinção ondulante incipiente; desenvolve contatos irregulares com plagioclásio, feldspato alcalino, anfibólio, biotita e titanita (Figuras 4 A-B-C). O Tipo-2 domina nas associações 3 e 4, onde forma cristais subédricos a anédricos médios a grossos com extinção ondulante forte; ocorre formando vênulas, veios e bolsões mineralizados com pirita, calcopirita e ouro, ou associado a carbonatos e micas brancas (Figuras 4 D-E-F). O Tipo-3 foi identificado somente nas porções mais alteradas da associação 4, onde a rocha se encontra intensamente hidrotermalizada e mineralizada; apresenta-se como cristais euédricos bipiramidais, de granulação fina a média (Figura 4 G-H-I).

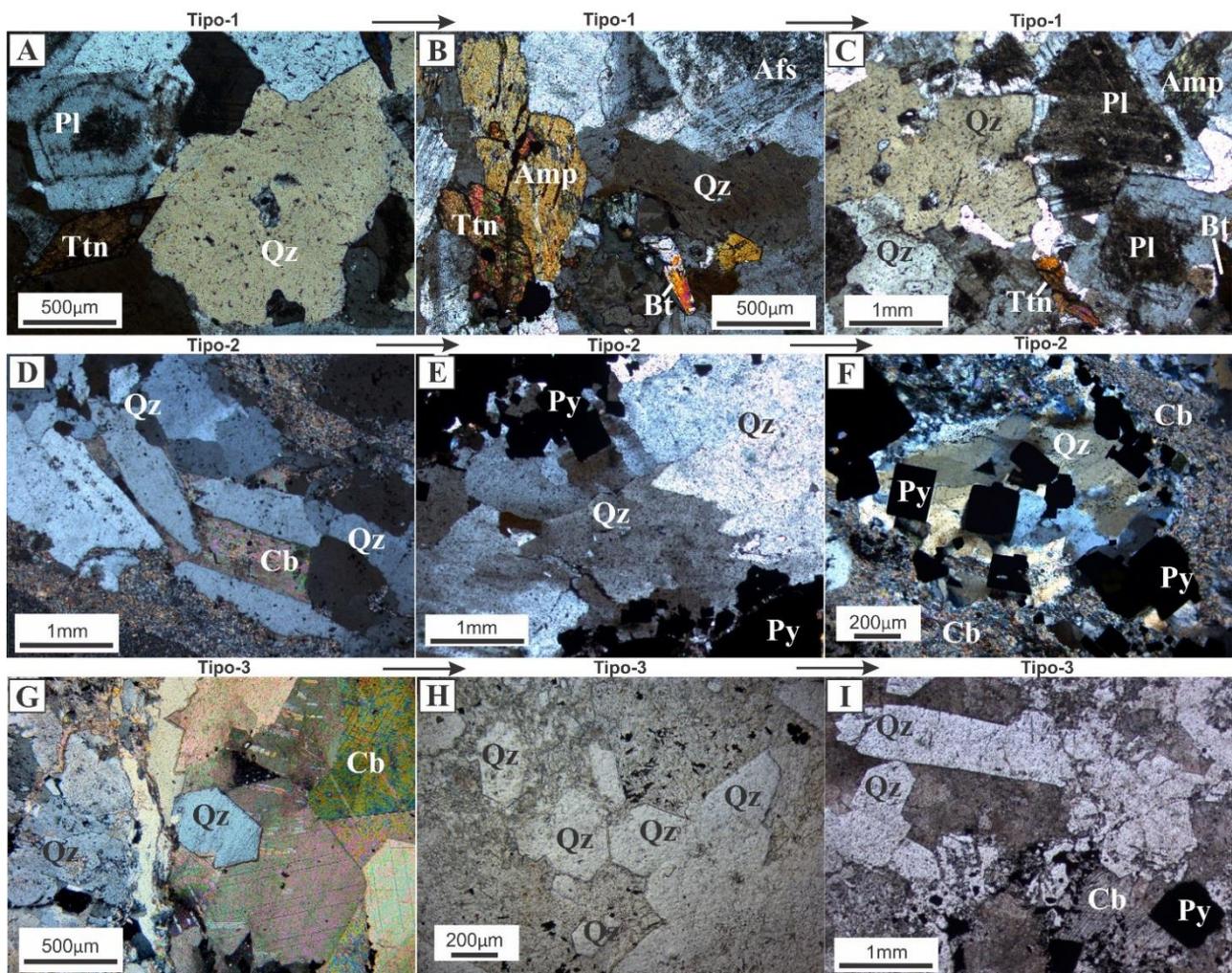


Figura 4 – Fotomicrografias de quartzo em luz transmitida (nicóis cruzados e paralelos). (A) Quartzo tipo-1, magmático, associado a plagioclásio zonado e titanita euédrica (Associação 1). (B e C) Quartzo Tipo-1 associado com plagioclásio saussuritizado e finos cristais de anfibólio, biotita e titanita (Associação 2). (D, E e F) Quartzo Tipo-2, apresentando cristais subédricos médios a grossos com extinção ondulante forte; forma vênulas, veios ou bolsões mineralizados (principalmente pirita) em contato com cristais de carbonato (Associações 3 e 4). (G, H e I) Quartzo Tipo-3 euédrico, incluso em carbonato ou associado à pirita. Afs=feldspato potássico, Amp=anfíbólio, Bt=biotita, Cb=carbonato, Pl=plagioclásio, Py=pirita, Qz=quartzo e Ttn=titanita. Seta=aumento da intensidade de alteração da rocha. Abreviações segundo Whitney & Evans (2010).

Estudo por Catodoluminescência

Imagens por CL revelaram zoneamentos composicionais, cristais reabsorvidos, fraturas preenchidas e outras feições intracristalinas, as quais permitiram distinguir cristais de quartzo magmático e hidrotermal no GSJJ. A intensidade de luminescência absoluta no quartzo não pode ser quantificada facilmente, pois a luminescência aparente observada nas imagens por CL depende das condições operacionais (Rusk & Reed 2002). Assim, nas descrições a seguir a intensidade de luminescência em CL é referida como tons de cinza, ou seja, baixa luminescência (cor cinza escura), luminescência moderada (cor cinza) e alta luminescência (cor cinza clara). Os cristais de quartzo foram estudados de acordo com a intensidade da alteração hidrotermal e a mineralização presente na rocha. Foram identificadas quatro diferentes gerações de quartzo (Qz1, Qz2, Qz3 e Qz4) descritas a seguir:

Qz1: ocorre predominantemente nas associações minerais 1 e 2; forma cristais anédricos preservados a fracamente fraturados, com luminescência moderada a alta (coloração cinza clara, Figura 5 A); associa-se a plagioclásio, anfibólio, biotita e titanita euédrica, e corresponde ao quartzo Tipo-1 definido em microscopia de luz transmitida. Também está presente nas associações 3 e 4, porém neste caso mostra-se intensamente fraturado e brechado (Figuras 5 B-C), com bordas corroídas e dissolvidas.

Qz2: posterior ao Qz1, é representado por vênulas de baixa luminescência (coloração cinza escura) que preenchem fraturas e seccionam o Qz1 (Figuras 5 B). Ocorre na associação 2 e se intensifica nas associações 3 e 4, associado à pirita (Figura 5 C). Essa geração de quartzo foi identificada apenas por imagens de CL, não tendo correspondente em luz transmitida.

Qz3: ocorre em veios e bolsões mineralizados (quartzo Tipo-2 em luz transmitida); é subédrico a anédrico, apresenta zoneamento parcial com alternância entre porções mais e menos luminescentes (Figuras 5 D-E-F); está presente na associação 4 juntamente com cristais de pirita e esfalerita, e mais raramente calcopirita e galena; nesta porção da rocha o ouro ocorre principalmente preenchendo fraturas na pirita ou incluso na esfalerita.

Qz4: representa a geração mais tardia, ocorre nas porções de rocha mais intensamente alteradas e mineralizadas a ouro; forma cristais euédricos finos a médios com zoneamento bem definido, alternando zonas escuras e luminescentes de espessura fina, comumente inclusos em carbonatos ou sericita, ou em contato com estes (Figuras 5 G-H-I). Corresponde ao quartzo do Tipo-3 em luz transmitida.

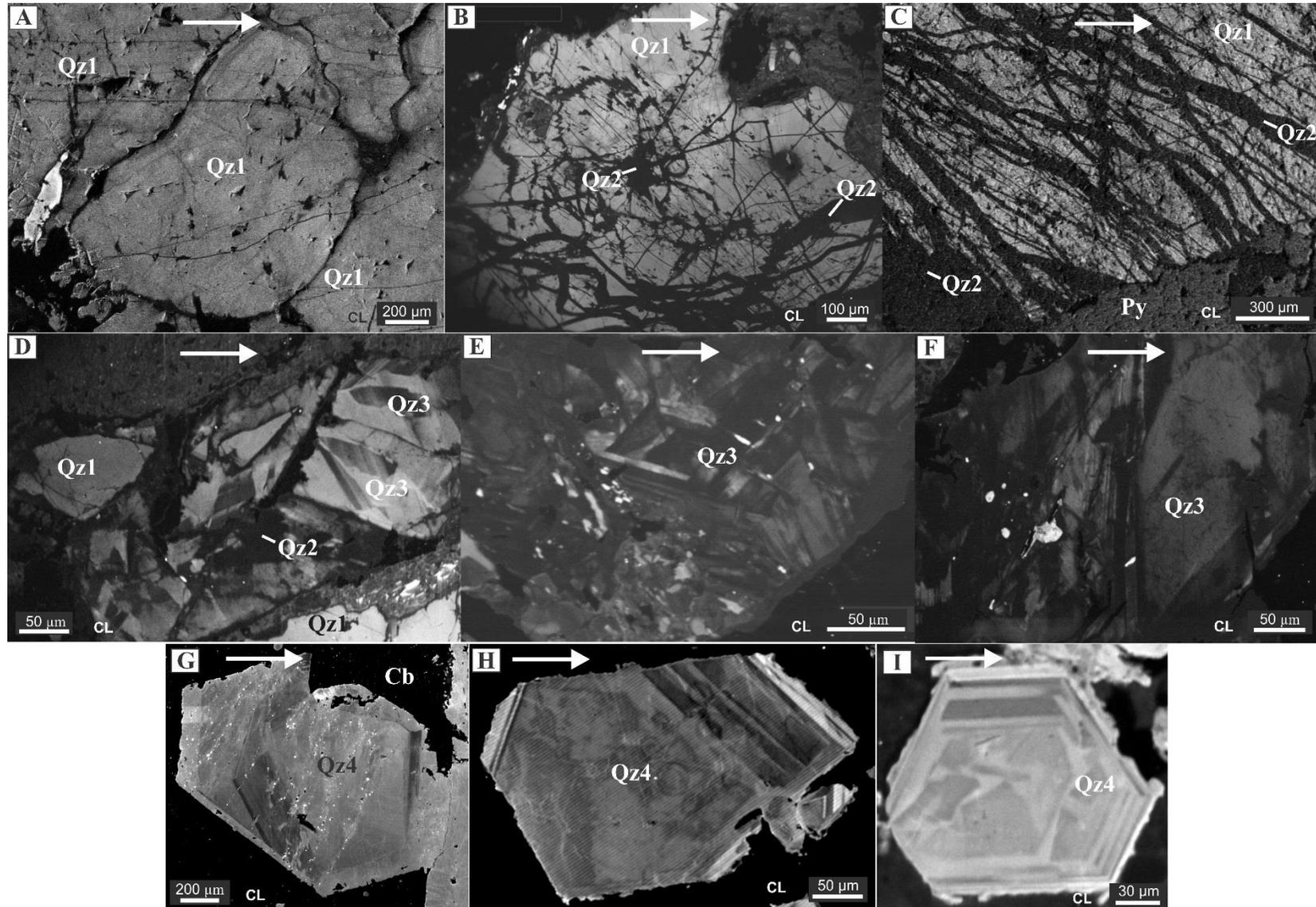


Figura 5 – (A-I) Tipos de quartzo identificados nas rochas do GSJJ através de imagens de MEV – CL. Qz1: magmático, anédrico e luminescente; Qz2: secundário, cinza escuro, pouco luminescente, preenche fraturas e secciona o Qz1; Qz3: hidrotermal, euédrico a subédrico, parcialmente zonado, com núcleos mais luminescentes; Qz4: hidrotermal, euédrico, neoformado, com zoneamento claro-escuro bem definido. Py=pirita; Cb=carbonato. Seta= intensidade de alteração na rocha

ANÁLISES QUÍMICAS DO OURO POR EDS

Nas associações minerais 1 e 2, onde ocorrem Qz1 e Qz2, as rochas são preservadas e sem mineralização associada. Nas associações minerais 3 e 4, onde as rochas estão intensamente hidrotermalizadas e mineralizadas, principalmente com pirita, esfalerita e ouro, Qz3 e Qz4 são dominantes. O ouro, frequente nas rochas mais hidrotermalizadas da associação 4, ocorre incluso ou preenchendo fraturas na pirita e esfalerita (Figura 6) ou associados ao Qz4 (Figura 7).

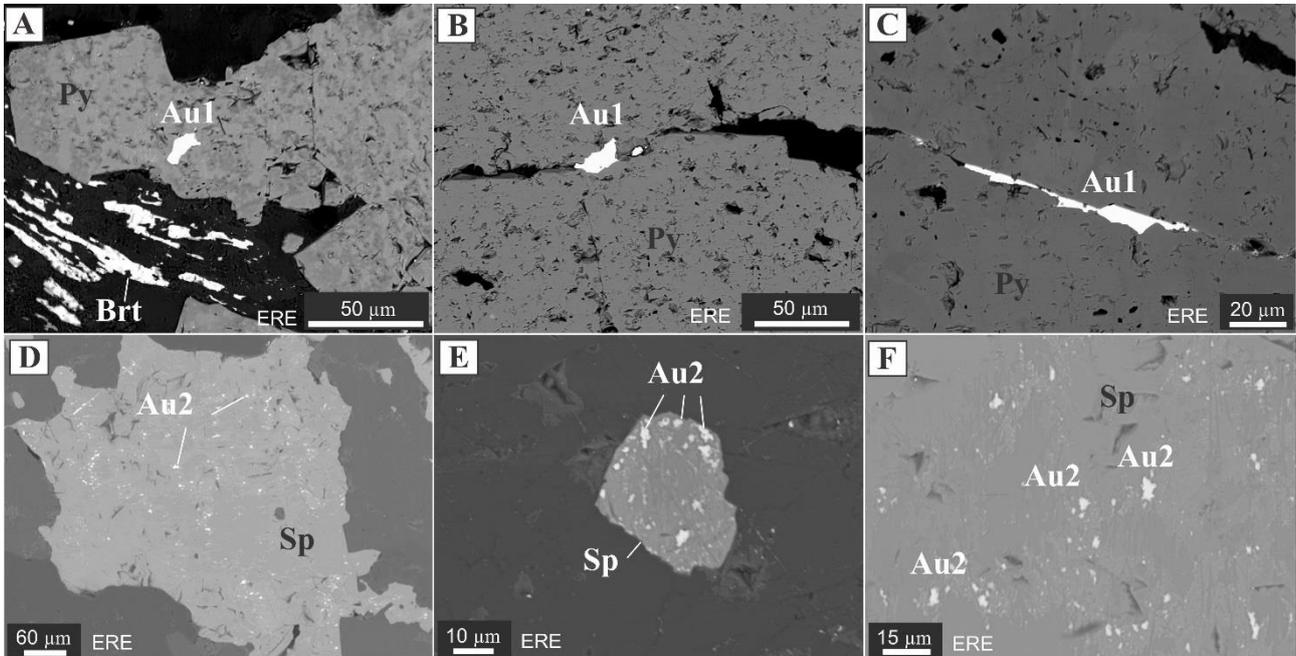


Figura 6 – Imagens de ERE utilizadas nas análises de EDS. (A, B e C) Primeira geração de ouro (Au1) inclusa ou preenchendo fraturas na pirita. (D, E e F) Segunda geração de ouro (Au2) hospedada em cristais de esfalerita. Qz=quartzo, Py=pirita, Sp=esfalerita, Brt=barita, Cb=carbonato. Abreviações segundo Whitney & Evans (2010).

Considerando as relações texturais entre ouro, pirita e quartzo observadas em imagens de ERE e CL, assim como as análises químicas realizadas por EDS (Tabela 2), foram identificadas duas gerações de ouro quimicamente distintas: Au1 correspondente ao ouro associado à pirita; Au2 correspondente ao ouro associado ao Qz4 e/ou incluso na esfalerita. As Análises das partículas de Au1 por EDS mostram teores elevados e variáveis de prata (4,3-23,7%), com exceção de uma análise (1,1%), baixos teores de telúrio (0,2-1,2%) e, conseqüentemente razões Au/Ag e Au/Te mais baixas e mais elevadas, respectivamente. O Au2 apresenta composição química distinta do Au1, com baixos teores de prata (<1,0%), altos e variáveis teores de telúrio (1,1-17,2%) e razões Au/Ag e Au/Te inversas àquelas do Au1. Neste contexto, a mineralização aurífera do depósito SJ seria marcada por dois eventos: o primeiro, com a deposição do ouro Au1 enriquecido em Ag e associado à pirita, e o segundo correspondente ao ouro Au2 com teores elevados de Te e associado ao Qz4 e à esfalerita.

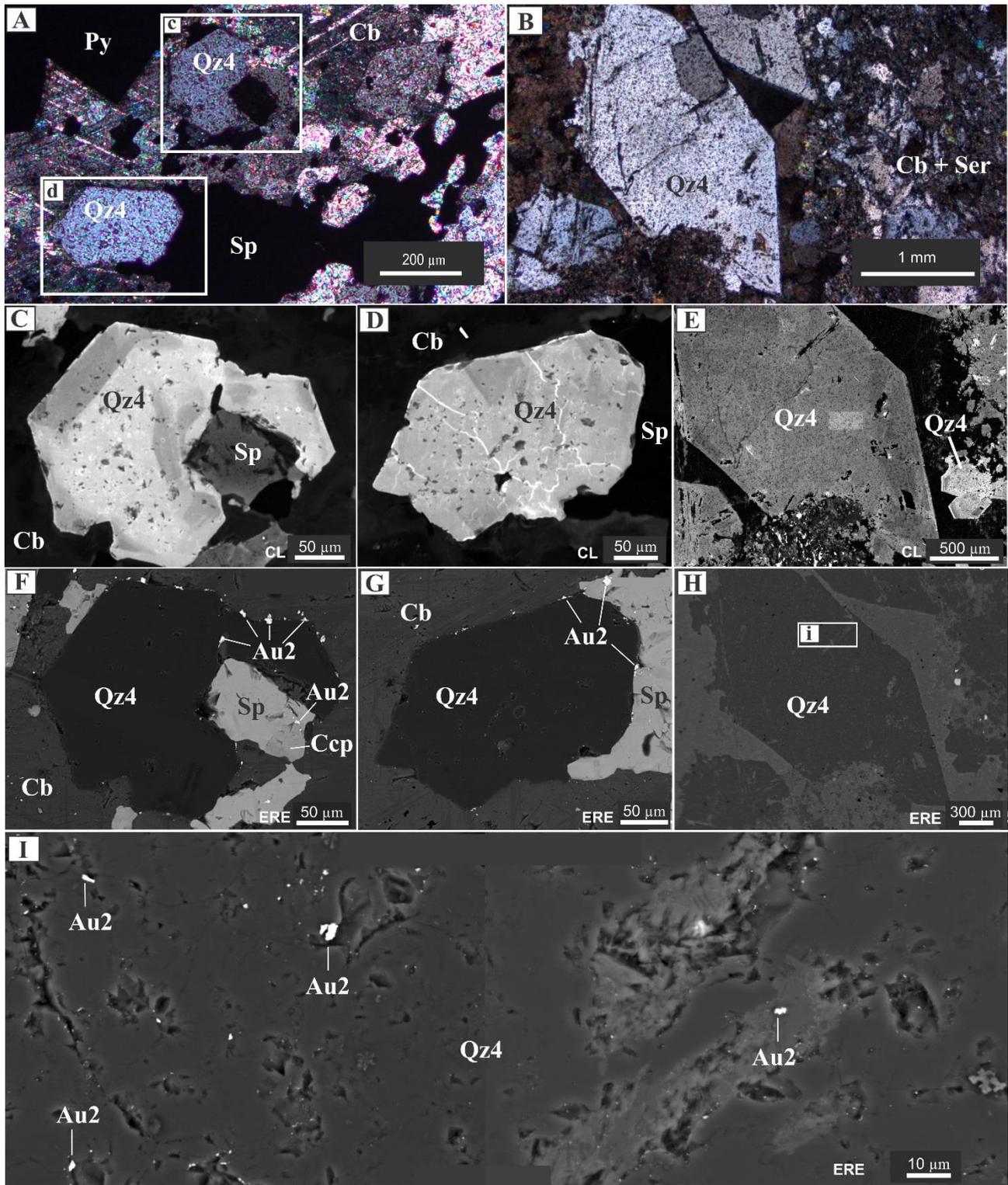


Figura 7 – Segunda geração de ouro (Au2). (A) Fotomicrografia de Qz4 incluído em carbonato e em contato com esfalerita. (B) Fotomicrografia de Qz4 associado a carbonato e sericita. (C, D e E) Imagens de CL mostrando zoneamento no Qz4. (F, G e H) Imagens de ERE utilizadas nas análises de EDS do Au2 presente nas bordas do Qz4 ou incluído neste e na esfalerita, sugerindo contemporaneidade entre essas fases minerais. (I) Detalhe da Figura 8H mostrando finos grãos de Au2 disseminados na estrutura do Qz4. Cb=carbonato, Py=pirita, Sp=esfalerita, Au=ouro, Qz=quartzo, Ccp=calcopirita. Abreviações segundo Whitney & Evans (2010).

Tabela 2 – Análises elementares médias por EDS (% peso) de fragmentos de ouro do depósito SJ.

	Lâmina	As	Ag	Te	Au	Bi	Total	Au/Ag	Au/Te
Au1 (Py)	FSJ-02-39 Img1 (1)	0,45	8,79	0,38	88,57	1,79	100	10,07	233,07
	FSJ-02-39 Img3 (1)	0,50	13,86	1,19	82,44	2,02	100	5,95	69,28
	FSJ-02-39 Img4 (3)	0,42	14,57	0,77	82,41	1,83	100	5,66	107,03
	FSJ-02-45 Img3 (3)	0,49	10,73	0,72	86,04	2,00	100	8,01	119,50
	FSJ-02-45 Img5 (1)	0,35	1,11	0,58	96,35	1,60	100	87,59	166,12
	FSJ-02-45 Img6 (2)	0,24	9,86	0,34	87,76	1,80	100	8,90	265,94
	FSJ-02-45 Img8 (2)	0,17	7,82	0,52	89,86	1,64	100	11,49	176,20
	FSJ-04-07 Img2 (2)	0,59	4,32	0,73	92,12	2,24	100	21,32	126,19
	FSJ-06-12 Img1 (3)	0,28	8,98	0,46	88,47	1,81	100	9,86	192,33
	FSJ-06-16 Img3 (2)	0,29	7,87	0,68	88,90	2,26	100	11,30	132,69
FSJ-09-14 Img3 (2)	0,29	23,74	0,22	73,91	1,84	100	3,11	335,91	
Au2 (Sp + Qz4)	FSJ-02-22 Img1 (1)	0,64	0,02	17,21	80,62	1,51	100	4031,00	4,68
	FSJ-02-22 Img2 (1)	0,48	0,00	9,75	88,10	1,68	100	-	9,05
	FSJ-02-22 Img3 (1)	0,67	0,83	2,77	93,54	2,19	100	112,70	33,89
	FSJ-02-25 Img1 (1)	0,32	0,13	15,93	81,22	2,40	100	624,77	5,10
	FSJ-02-25 Img2 (2)	0,51	0,02	5,39	92,27	1,82	100	5766,25	17,12
	FSJ-02-25 Img3 (4)	0,53	0,07	14,54	82,99	1,88	100	1185,43	5,71
	FSJ-02-25 Img6 (3)	0,48	0,05	1,32	95,87	2,28	100	1917,40	72,63
	FSJ-02-25 Img8 (3)	0,59	0,00	1,14	95,63	2,65	100	-	84,63
	FSJ-02-25 Img9 (5)	0,50	0,02	6,64	90,18	2,65	100	4509,00	13,58
	FSJ-02-25 Img11 (1)	0,61	0,98	1,57	93,70	3,14	100	95,60	59,68

Img=imagem ERE dos grãos de ouro analisados por EDS. Au1=primeira geração de ouro associada à pirita (Py); Au2=segunda geração de ouro associada ao Qz4 e esfalerita (Sp). Entre parênteses=número de análises pontuais realizadas. Au=ouro, Ag=prata, Te=telúrio, Bi=bismuto e As=Arsênio.

DISCUSSÕES

Texturas em CL

Dissolução de quartzo luminescente, intercrescimento de quartzo escuro, dilatação de cristais, recristalização e zoneamentos, são exemplos de texturas que podem ser observadas por CL. Texturas como zonas de crescimento presentes no quartzo podem indicar diversas gerações de inclusões fluidas ou “demarcar” específicos episódios de mineralização, podendo ser utilizadas para o estudo de depósitos (Rusk & Reed 2002; Rusk *et al.* 2008). Essas texturas podem ser caracterizadas de acordo com variação na luminescência do cristal. A alta luminescência é emitida por cristais de quartzo formados a temperaturas >400 °C e que apresentam altas concentrações de elementos traços como Ti e Al, principais ativadores da CL neste mineral (Wark & Watson 2006; Rusk 2008; Larsen *et al.* 2009; Vasyukova *et al.* 2013). Através de análises químicas por Microsonda Eletrônica, Rusk (2008) obteve concentrações de até 450 ppm de Ti no quartzo presente em veios de depósitos formados sob temperaturas entre 500 a 700 °C; enquanto que no quartzo dos depósitos formados entre 100 e 300 °C, as concentrações de Ti ficam geralmente em torno de 100 ppm.

Na área do depósito de ouro São Jorge, a ação de fluidos hidrotermais e as alterações mineralógicas e hidrotermais estão sistematicamente registradas nas rochas do GSJJ (Borges *et al.* 2009; Borges 2010). As imagens por MEV-CL mostraram que a alteração progressiva do Qz1 e a cristalização de novas gerações Qz2, Qz3 e Qz4 certamente foram controladas pela ação desses fluidos e dos processos hidrotermais e mineralizadores dessas rochas. As principais texturas presentes são: faturamento, corrosão e dissolução do quartzo luminescente (Qz1); vênulas formadas por quartzo escuro (Qz2) que seccionam o Qz1, exibindo um aspecto brechóide nos cristais; e zoneamento euédrico em cristais de quartzo hidrotermal (Qz3 e Qz4), caracterizado pela alternância entre zonas de crescimento escuras e claras e interpretado como resultado da reorganização espacial dos elementos traços (provavelmente Ti) na estrutura do cristal. Essas transformações afetaram os cristais de quartzo desde a rocha preservada e estéril até as porções intensamente hidrotermalizadas e mineralizadas.

No GSJJ por exemplo, o quartzo menos luminescente (Qz2) ocorre associado à pirita e constitui grande parte do veios mineralizados (Figura 5 C), enquanto que o quartzo zonado euédrico (Qz4) ocorre associado à esfalerita e ao ouro (Figura 7). Neste estudo, propõe-se que o Qz1 é de origem magmática, foi formado em altas temperaturas, pois é dominante na associação 1 (magmática) de temperatura ≥ 700 °C, e possivelmente mais enriquecido em Ti do que os demais tipos, devido a sua alta luminescência. O Qz2 foi formado em temperaturas mais baixas (340 – 280°C, associações 3 e 4 onde é dominante), mostra baixa luminescência e, possivelmente, conteúdo de Ti muito baixo. Os quartzos Qz3 e Qz4, também de origem hidrotermal, são produtos de recristalização dos quartzos Qz1 e Qz2 durante os estágios finais da alteração hidrotermal. Na Tabela 3 estão sintetizadas as

informações texturais dos tipos de quartzo em correlação com as principais características das associações minerais da área do depósito SJ.

Alteração e Evolução do Quartzo

Através de imagens de CL, cinco estágios de evolução do quartzo (Figura 8), correlacionados às diferentes associações minerais citadas anteriormente, foram propostos:

Estágio 1 – Correspondente à associação mineral 1. A superfície do Qz1 luminescente (origem magmática), ainda preservada, fica em contato direto com fluidos hidrotermais magmáticos ou primários (alteração deutérica) e, portanto, mais suscetível à alteração do que o núcleo do cristal. O processo de dissolução do cristal inicia pelas suas bordas expostas aos fluidos; neste estágio a rocha ainda preserva sua textura ígnea original.

Estágio 2 – Marca a transição entre as associações minerais 1 e 2 e corresponde à rocha magmática modificada. Os cristais de quartzo permanecem sob a ação contínua dos fluidos, o processo de dissolução aumenta e zonas de fraqueza são formadas nos cristais, facilitando o faturamento e a dissolução do Qz1. Este estágio é correlacionável ao início da desestabilização dos minerais ferromagnesianos (anfíbólio e biotita) que caracteriza a associação mineral 2.

Estágio 3 – Corresponde à associação mineral 3, caracterizada pela intensificação dos processos hidrotermais. Os fluidos hidrotermais secundários passam a percolar as fraturas e a reagir com o Qz1, precipitando Qz2 de baixa luminescência (cinza). Este estágio é correlacionável ao início da sulfetação e carbonatação da rocha.

Estágio 4 – Marca a transição entre as associações minerais 3 e 4 e corresponde ao aumento da mineralização em sulfetos (principalmente pirita) com Au associado. A precipitação de Qz2 nas fraturas e consequente dilatação do Qz1 aumentam, e novas fraturas seccionam Qz1 e Qz2, conferindo aspecto brechóide aos cristais.

Estágio 5 – corresponde exclusivamente à associação mineral 4, em que se estabeleceu o ápice da alteração hidrotermal; é caracterizado pela intensa ação dos fluidos hidrotermais mais tardios, acompanhada de alteração fílica, sulfetação e mineralização aurífera. Este estágio é marcado pela geração de veios de quartzo (Qz3) e cristais neoformados zonados (Qz4) com inclusões de partículas de ouro.

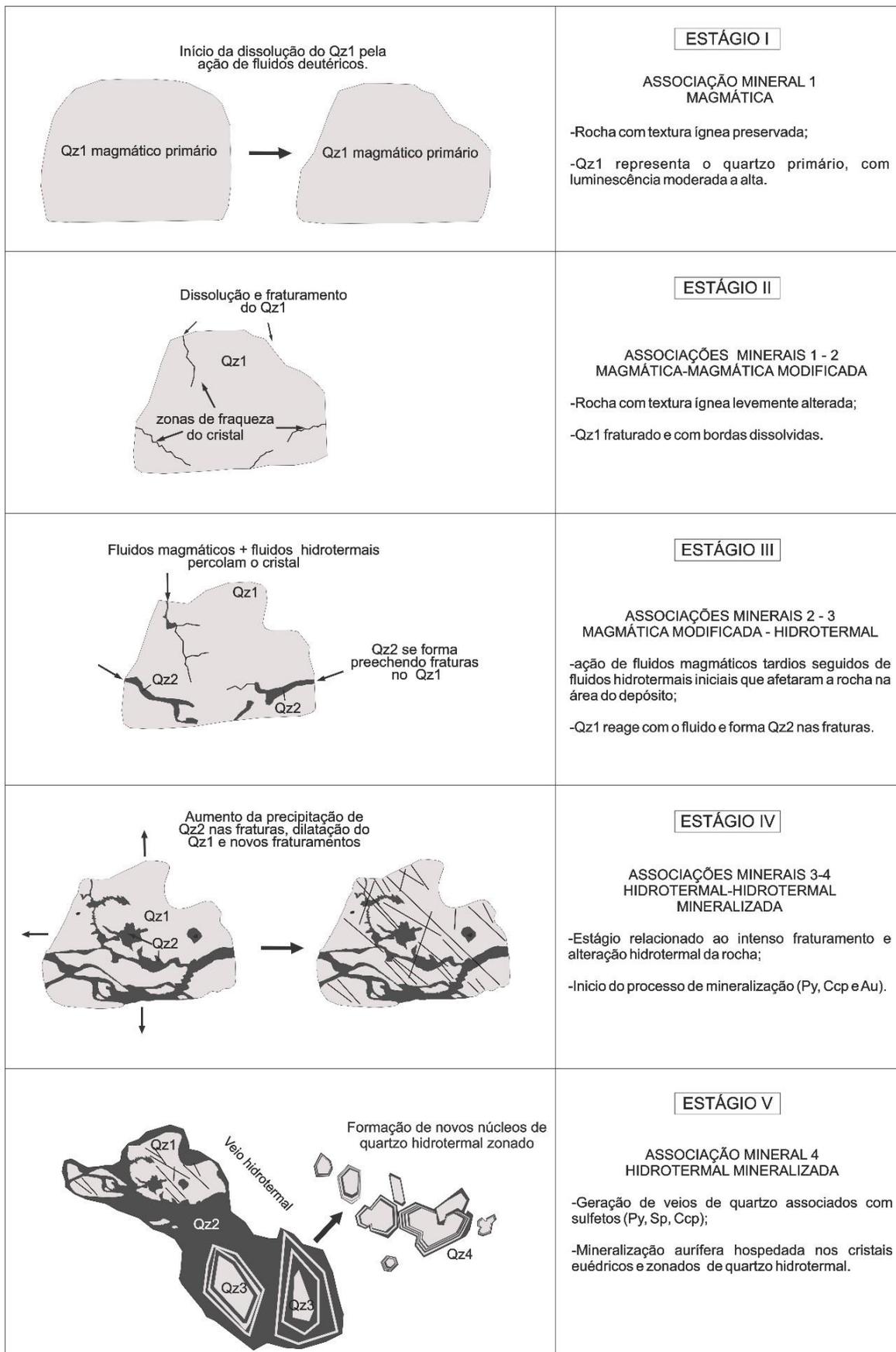


Figura 8 – Esquema de alteração e evolução do quartzo em CL. Estágio I – (Qz1) representa o quartzo luminescente de origem magmática. Estágio II – Qz1 fraturado e com bordas corroídas. Estágio III – Qz1 reage com os fluidos hidrotermais, cristalizando Qz2 escuro nas fraturas. Estágio IV – aumento na formação de Qz2 concomitante com o processo de mineralização da rocha. Estágio V – Geração de veios e novos núcleos de quartzo hidrotermal zonado (Qz3 e Qz4). Py=pirita; Ccp=calcopirita; Sp=esfalerita; Au=ouro.

Tabela 3 – Relação entre tipos de quartzo e associações minerais identificadas na área do depósito SJ.

TIPOS DE QUARTZO EM CL		DADOS COMPARATIVOS (GSJJ, Borges <i>et al.</i> 2009)		
Quartzo dominante	Características morfológicas	Associação mineral	Temperatura estimada/ Marcadores mineralógicos	Tipos de alteração
Qz1	Cristais anédricos médios, luminescentes, com textura granular ígnea preservada.	1- Qz, Afs, Pl _(And-Olig) , Amp, Bt1, Ttn, Mgt, Ilm, Zrn e Ap	≥ 700°C Amp + Pl _(And-Olig)	Estágio magmático
Qz2 (<Qz1)	Cristais anédricos, luminescentes, levemente fraturados (Qz1), seccionados por vênulas de quartzo cinza pouco luminescentes (Qz2).	2- Qz, Afs, Pl _(Alb) , Bt1, Ttn, Mag, Ilm, Zrn, Ap, Ep e Chl.	450 – 350°C Bt1 + Ep	Pós-magmática (saussuritização)
Qz3 + Qz2 (>Qz1)	Cristais anédricos a subédricos, luminescentes, intensamente fraturados (Qz1), cortados por quartzo escuro (Qz2), associados a cristais médios e subédricos, moderadamente zonados (Qz3), que constituem os veios de quartzo (Qz3+Qz2±Qz1).	3- Qz, Pl _(Alb) , Afs, Bt2, Chl, Cb, Ser, Py, Zrn e Ap.	340 – 280°C Chl + illita+ Pl descalcificado+Bt2	Propilítica (cloritização)
Qz4 + Qz3 (<Qz2)	Cristais neoformados, euédricos, finos a médios, com zoneamento oscilatório bem definido (Qz4), hospedeiros do Au.	4- Qz, Bt3, Cb, Ser, Chl, Py, Ccp, Sp e Au.	≤ 300°C Mica branca+Cb+Chl+Py+Bt3	Fílica (carbonatação, sericitização, sulfetação)

Qz1, Qz2, Qz3, Qz4: conforme Figura 5. Qz=quartzo, Afs=feldspato potássico, Ab=albita, Pl=plagioclásio, Amp=anfیبólio, Ttn=titanita, Mag=magnetita, Olig=oligoclásio, Ilm=ilmenita, Zrn=zircão, Ap=apatita, Ep=epidoto, Chl=clorita, Cb=carbonato, Ser=sericita, Py=pirita, Ccp=calcopirita, Sp=esfalerita e Au=ouro. Bt1: biotita marrom. Bt2: biotita marrom esverdeada. Bt3: biotita verde clara de granulação muito fina. And: andesina. Abreviações segundo Whitney & Evans (2010).

Implicações metalogenéticas

A mineralização presente no depósito São Jorge é representada por sulfetos (principalmente pirita, esfalerita e calcopirita) e ouro, presente nos veios ou disseminados na rocha alterada (associações 3 e 4). A pirita é o sulfeto mais abundante; ocorre principalmente nos veios de quartzo, forma cristais euédricos a subédricos, finos a médios (200 - 900 μm), associados ao carbonato; formou-se na rocha a partir da associação 3 (ver Tabela 3). A esfalerita é o segundo sulfeto mais abundante; forma cristais anédricos subédricos, inclusos no carbonato ou em contato com o Qz4; está presente nas zonas intensamente sericitizadas. A calcopirita ocorre em menor quantidade, geralmente inclusa na pirita ou disseminadas nos veios. O ouro ocorre incluso nos cristais de pirita e esfalerita ou preenchendo fraturas neles; ocorre também associado aos cristais de quartzo (Qz4) e carbonato.

A origem dos sulfetos ou a fonte dos metais (Fe, Cu e Zn) pode estar diretamente relacionada à composição química da rocha hospedeira e aos fluidos hidrotermais atuantes. Os fluidos quentes circulam com facilidade pelas fraturas e resfriam de maneira rápida ao entrar em contato com a rocha fria, beneficiando a precipitação dos metais. Em seu estudo metalogenético do GSJJ, Borges (2010) sugeriu que o fluido hidrotermal rico em metais deu origem aos veios de quartzo mineralizados, e que o ouro foi transportado como tiocomplexo, principalmente $\text{Au}(\text{HS})_2$ e $\text{HAu}(\text{HS})_2$. Através da composição química desses tiocomplexos, pode-se inferir que os fluidos hidrotermais transportavam conteúdos de íon S^- . Quanto aos íons Fe^{+2} , Cu^{+2} e Zn^+ , podem ter sido liberados das rochas do GSJJ quando atingidas pelos fluidos, permitindo a reação $\text{S}^- + \text{Fe}^{+2} \pm \text{Cu}^{+2}$, formando as fases sulfetadas pirita, e mais raramente calcopirita. Conseqüentemente, com a diminuição no conteúdo de Fe^{+2} e Cu^{+2} , o Zn^+ , por sua vez, começou a reagir com o S^- gerando sulfetos mais tardios na associação 4 (principalmente esfalerita, ver Tabela 3). A constante diminuição da concentração de S^- no fluido e a contínua presença de íons metálicos podem ter provocado a quebra dos tiocomplexos $\text{Au}(\text{HS})_2$ e $\text{HAu}(\text{HS})_2$, liberando novos íons S^- (para reagir com o Zn^+ restante no sistema) e precipitando partículas de ouro sobre os minerais pré-existentis (pirita, esfalerita, carbonatos e quartzo hidrotermal).

As análises por EDS indicam dois tipos de ouro quimicamente distintos: Au1 enriquecido em Ag e associado à pirita, e Au2 enriquecido em Te e associado à esfalerita e ao Qz4, ambos formados nos estágios mais avançados do hidrotermalismo. A diferença composicional Au1 e Au2 pode ser melhor observada nos diagramas geoquímicos envolvendo Au, Ag e Te. No diagrama Au vs Ag (Figura 9A), o Au1 associado a cristais de pirita mostra um *trend* de enriquecimento em Ag e um decréscimo no conteúdo de Au, o que pode indicar a substituição de Au por Ag, enquanto o Au2 associado ao Qz4, esfalerita e calcopirita, apresenta comportamento inverso. Por outro lado, o diagrama Au vs Te (Figura 9B) mostra que o Au2 se enriquece em Te enquanto o Au1 empobrece. No diagrama envolvendo as razões Au/Ag vs Au/Te (Figura 9C), Au1 e Au2 apresentam *trends*

inversos. O diagrama ternário que relaciona Au, Ag/2 e Te/2 (Figura 9D), também apresenta uma forte separação composicional entre as duas gerações de ouro.

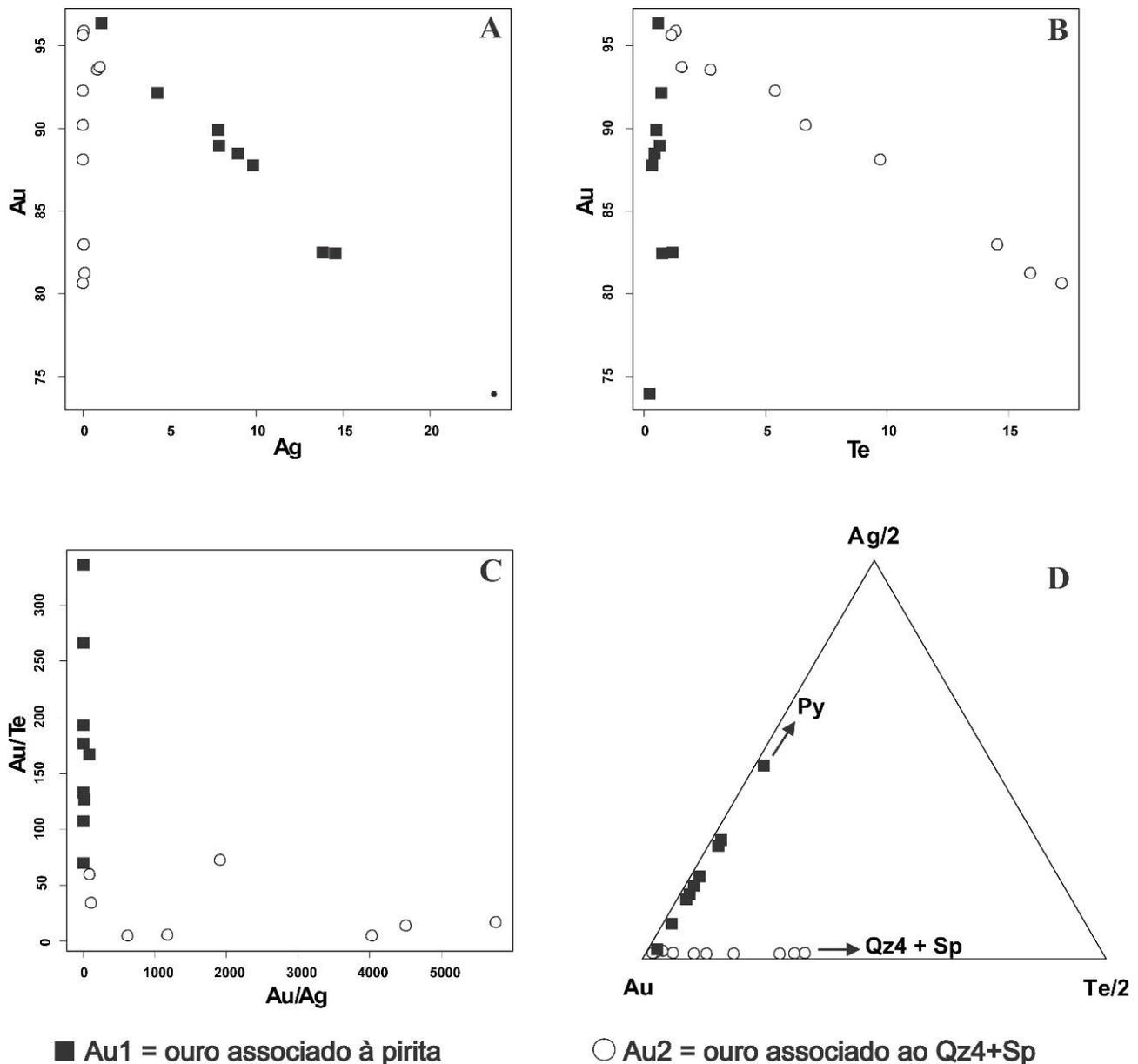


Figura 9 – Diagramas composicionais mostrando as relações entre conteúdos de Au, Ag e Te (% em peso) das gerações Au1 e Au2. (A) Au vs Ag. (B) Au vs Te. (C) Au/Te vs Au/Ag. (D) Au-Ag/2-Te/2. Análises obtidas por EDS.

O estudo não permitiu a identificação das possíveis fontes desses metais presentes na composição química do ouro. Sabe-se que a presença de teluretos e selenetos de prata são comuns na composição química de minérios de outros depósitos da região. No depósito aurífero da Mina do Palito, localizado nesta mesma província aurífera, teluretos e selenetos de bismuto e prata, sulfossais e ligas de ouro e prata (com 25 a 30% de Ag) são típicos do minério (Juliani *et al.* 2002). As possíveis causas das variações químicas do ouro podem ser explicadas por processos de substituição iônica entre Au, Ag e Te, mobilidade química (Ag e Te), mecanismo de precipitação (reação fluido-rocha,

mistura de fluidos, separação de fases), variações no pH, fO₂, T. Entretanto, uma abordagem mais precisa de tais processos está além dos reais objetivos deste estudo.

CONCLUSÕES

Os aspectos petrográficos e mineralógicos das rochas do GSJJ, bem como os diferentes níveis de alteração hidrotermal e a mineralização presente na área do depósito SJ, são parâmetros que podem auxiliar os estudos de quartzo por meio de MEV-CL. Este estudo permitiu estabelecer uma relação direta e cronológica entre a evolução morfológico-textural do quartzo e os processos de alteração e mineralização da rocha. Quatro gerações de quartzo foram identificadas por CL: a primeira de origem magmática (Qz1 luminescente) presente nas rochas estéreis; a segunda (Qz2, não luminescente), provavelmente de temperatura mais baixa e associada aos estágios tardimagmáticos, marca o início da alteração textural do quartzo e possivelmente o início da alteração hidrotermal da rocha hospedeira; a terceira e a quarta gerações de origem tipicamente hidrotermal (Qz3 e Qz4 zonados), presentes nas rochas intensamente hidrotermalizadas e mineralizadas. O Qz4 representa a geração mais tardia, ocorrendo na forma de cristais neoformados, zonados, inclusos no carbonato e na sericita ou em contato com eles; representa um marcador da mineralização aurífera do GSJJ. Imagens de ERE-CL e análises de EDS indicam que a mineralização aurífera do depósito SJ está presente nas porções mais hidrotermalizadas e é representada por duas gerações quimicamente distintas: a primeira (Au1), enriquecida em Ag e inclusa ou preenchendo fraturas na pirita; a segunda (Au2), com teores elevados de Te e associada ou hospedada em cristais de Qz4, esfalerita e, mais raramente, calcopirita. Este estudo mostrou que cristais de quartzo podem representar um excelente marcador da evolução magmática, das alterações hidrotermais e da mineralização aurífera correspondentes às rochas do depósito SJ. A metodologia MEV-CL em cristais de quartzo se firma como importante ferramenta complementar em estudos petrológicos e metalogenéticos.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará-UFGPA, ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica-GPPG e ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides-GPPG da UFGPA, ao geólogo Dr. Marcelo Lacerda Vasquez da CPRM-Belém. Este trabalho é uma contribuição ao Instituto de Geociências da Amazônia – GEOCIAM (programa INCT – CNPq/MCT/FAPESPA – processo 573733/2008-2), com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES.

REFERÊNCIAS

- Borges R.M.K., Dall'Agnol R., Lamarão C.N., Figueiredo M.A.B., Leite A.A. Da Silva, Barros C.E. de Mesquita, 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, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 58 p.
- Breiter K., Müller A. 2009. Evolution of rare-metal granitic magmas documented by quartz chemistry. *European Journal of Mineralogy*, **21**:335-346.
- D'Lemos R. S., Kearsley A. T., Pembroke J. W., Watt G. R., Wright P. 1997. Complex quartz growth histories in granite revealed by scanning cathodoluminescence techniques. *Geological Magazine*, **134**:549-552.
- Faraco M.T.L., Carvalho J.M.A., Klein E.L. 1997. *Carta metalogenética da Província Aurífera do Tapajós*. In: Costa M.L. & Angélica R.S. (Coord.). Contribuições à geologia da Amazônia, Belém: FINEP/SBG-Núcleo Norte, p. 423-443.
- Ferreira A.L., Almeida M.E., Brito M.F.L., Monteiro M.A.S. 2000. *Geologia e recursos minerais da Folha Jacareacanga (SB.21-Y-B), Estados do Amazonas e Pará*. Nota explicativa, Projeto Especial Província Mineral do Tapajós. Manaus, PROMIM Tapajós/CPRM, escala 1: 250.000. 1 CD-ROM.
- Hogan J. P. 1993. Monomineralic glomerocrysts: Textural evidence for mineral resorption during crystallization of igneous rocks. *Journal of Geology*, **101**:531-540.
- Juliani C., Corrêa-Silva R.H., Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Nunes C.M.D. 2002. The Batalha Au–granite system Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil: hydrothermal alteration and regional implications. *Precambrian Research*, **199**(1-4):225-256.
- 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).
- Klein E.L., Santos R.A., Fuzikawa K., Angélica R.S. 2001. Hydrothermal fluid evolution and structural control of the Guarim mineralization, Tapajós Province, Amazonian craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, **36**(2):149-164.
- Lamarão C.N. & Dall'Agnol R. 2002. Granitóides São Jorge Antigo e São Jorge Jovem: petrografia e geoquímica de magmatismo cálcico-alcálico alto-K paleoproterozóico na Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. In: Klein E.L., Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. (Eds.). Contribuições à Geologia da Amazônia, SBG-NO, Belém, **3**:53-66.
- 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., 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.
- Lamarão C.N., Rocha K.K.N., Marques G.T., Borges R.M.K. 2013. Quartzo e zircão como marcadores da evolução magmático-hidrotermal do Granito Antônio Vicente, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Carajás. *Revista do Instituto de Geociências – USP, São Paulo*, **13**(2):4-68.
- Lamarão C.N., Silva J.S., Borges R.M.K., Dall'Agnol R. 2014. Morphological and compositional variations of zircon and their metallogenetic implications: the example of the Jamon, Serra dos Carajás and Velho Guilherme suites, Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, **44**(1):105-120.
- Landtwing M.R. & Pettke T. 2005. Relationships between SEM-cathodoluminescence response and trace-element composition of hydrothermal vein quartz. *American Mineralogist*, **90**:122-131.
- Larsen R.B., Jacamon F., Kronz A. 2009. Trace element chemistry and textures of quartz during the magmatic hydrothermal transition of Oslo Rift granites. *Mineralogical Magazine*, **37**(4):691-707.
- Loomis T.P. & Welber P.W. 1982. Crystallization processes in the Rocky Hill granodiorite Pluton, California: An interpretation based on compositional zoning of plagioclase. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **8**(14):230-239.
- Melo A.F.F., Andrade A.F., Yamaguti H.S., Oliveira J.R., Carmona J.R.M., D'antona R.J.G., Lopes R.C. 1980. Projeto Tapajós-Sucunduri. CPRM/DNPM, v. 1A, p.1-356.
- Müller A., Seltaman R., Behr H-J. 2000. Application of cathodoluminescence to magmatic quartz in a tin granite-case study from the Schellerhau granite Complex, Eastern Erzgebirge, Germany. *Mineralium Deposita*, **35**:169-18.
- Müller A., Kronz A., Breiter K. 2002. Trace elements and growth pattern in quartz: a fingerprint of the evolution of the subvolcanic Podlesí Granite System (Krusné Hory, Czech Republic). *Bulletin of Czech Geological Survey*, **77**:135-145.
- Müller A., René M., Behr H. J., Kronz A. 2003. Trace elements and cathodoluminescence in igneous quartz in topaz granites from the Hub Stock (Slavkovský Les Mts., Czech republic). *Mineralogy and Petrology*, **79**:167-191.
- Müller A., Breiter K., Seltmann R, Pécskay Z. 2005. Quartz and feldspar zoning in the eastern Erzgebirge volcano-plutonic complex (Germany, Czech Republic): evidence of multiple magma mixing. *Lithos*, **80**:201-227.
- 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 Jamaxim. CPRM/DNPM, **1-3**:614 p.
- Quadros M.L.E.S., Bahia R.B.C., Klein E.L., Vasquez M.L., Almeida M.E., Ricci P.S.F. 1999. As intrusões básicas da Província Mineral do Tapajós (PMT) e possibilidades de mineralizações associadas. *In: 6º Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus, Brasil. Anais*, p. 567–569.

Ricci P.S.F., Vasquez M.L., Santos A., Klein E.L., Jorge João X.S., Martins R.C. 1999. Suíte Intrusiva Creporizão – Província Tapajós: proposta e critérios de definição. *In: 6º Simpósio de Geologia da Amazônia, Anais*, p. 519-522.

Rusk B.G. & Reed M.H. 2002. Scanning electron microscope - cathodoluminescence analysis of quartz reveals complex growth histories in veins from the Butte porphyry copper deposit, Montana. *Geology*, **30**(8):727–730.

Rusk B.G., Reed M.H., Dilles J.H., Kenti A.J.R. 2006. Intensity of quartz cathodoluminescence and trace-element content in quartz from the porphyry copper deposit at Butte, Montana. *American Mineralogist*, **91**:1300-1312.

Rusk B.G., Lowers H.A., Reed M.H. 2008. Trace elements in hydrothermal quartz: Relationships to cathodoluminescent textures and insights into vein formation. *The Geological Society of America*, **36**(7):547-550.

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 and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, **3**:453-488.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2001. 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 South American Earth Science*, **15**:409-429.

Sato K. & Tassinari C.C.G. 1997. Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico baseados em idade-modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. *In: Costa M.L.C. & Angélica R.S. (eds.) Contribuições à Geologia da Amazônia, Belém. In: Simpósio Brasileiro de Geologia*, **1**:91-142.

Slaby E., Götze J., Wörner G., Wrzalik R., Smigieski M. 2008. K-feldspar phenocrysts in microgranular magmatic enclaves: a cathodoluminescence and geochemical study of crystal growth as a marker of magma mingling dynamics. *Lithos*, **105**:85-97.

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

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. *In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. p. 471-485.

Vasquez M.L. & Klein E.L. 2000. Geologia e recursos minerais da Folha Rio Novo - SB.21 - Z- C, Estado do Pará. Nota explicativa. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós. Brasília, CPRM, PROMIM Tapajós, escala 1:250.000. 1 CD-Rom.

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. In: Simpósio Brasileiro de Geologia*, **3**:67-84.

Vasquez L.V., Rosa-Costa L.R., Silva C.G., Ricci P.F., Barbosa J.O., Klein E.L., Lopes E.S., Macambira E.B., Chaves C.L., Carvalho J.M., Oliveira J.G., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. Geologia

e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas - SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Organizadores, Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.

Vasyukova O.V., Kamenetsky V.S., Goemann K., Davidson P. 2013. Diversity of primary CL textures in quartz from porphyry environments: implication for origin of quartz eyes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **166**:1253–1268.

Wark D.A. & Watson E.B. 2006. The TitaniQ: a Titanium-in-Quartz Geothermometer. *Contributions to Mineral Petrology*, (152):743-754.

Whitney D.L. & Evans B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**:185-187.

Wiebe R.A., Wark D.A., Hawkins D.P. 2007. Insights from quartz cathodoluminescence zoning into crystallization of the Vinalhaven granite, coastal Maine. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **154**:439-453.

.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O quartzo é um dos principais minerais formadores de rochas ígneas e particularmente abundante em depósitos hidrotermais. Seu estudo morfológico através de imagens por CL vem crescendo nos últimos anos em decorrência da capacidade desta ferramenta em revelar feições de sua estrutura interna, impossíveis de serem observadas com outras metodologias. Além disso, texturas e zonas de crescimento complexas armazenam diversas gerações de inclusões fluidas que podem ser utilizadas para o estudo do depósito (Rusk & Reed 2002; Rusk *et al.* 2008).

Nas associações minerais reconhecidas por Borges *et al.* (2009) para a área do depósito SJ, foram individualizadas 4 gerações de quartzo, denominadas Qz1, Qz2, Qz3 e Qz4, utilizando-se imagens por CL. O **Qz1** representa o quartzo magmático; domina nas associações minerais 1 e 2, isentas de mineralização e ricas em feldspatos e anfibólio, para as quais estimam-se temperaturas de cristalização de $\geq 700^{\circ}\text{C}$ e $450\text{-}350^{\circ}\text{C}$, respectivamente (Tabela 4.2); apresenta-se na forma cristais anédricos médios, luminescentes, com textura granular ígnea preservada. O **Qz2** representa o quartzo de mais baixa temperatura, associada aos estágios tardi-magmáticos; ocorre desde a associação mineral 2, mas é dominante na associação mineral 3, caracterizada por intensa cloritização e com temperaturas de formação estimadas entre $340\text{-}280^{\circ}\text{C}$; ocorre como vênulas e veios de coloração cinza escura (pouco luminescente) que seccionam os cristais de Qz1 intensamente fraturados. O **Qz3** corresponde ao quartzo tipicamente hidrotermal; forma cristais médios, subédricos e moderadamente zonados que constituem os veios de quartzo centimétricos mineralizados em sulfetos (pirita e esfalerita); ocorre principalmente na associação mineral 4 ($\leq 300^{\circ}\text{C}$). O **Qz4** representa o quartzo hidrotermal mais tardio; foi identificado somente nas porções mais intensamente hidrotermalizadas e mineralizadas da associação mineral 4; forma cristais finos a micrométricos fortemente zonados, com faces bem definidas, contendo finas inclusões de ouro. Além de caracterizar morfológicamente os tipos de quartzo presentes na área do depósito SJ, as imagens por CL permitiram tecer comentários sobre os processos de formação, alteração e evolução deste mineral, sendo propostos cinco estágios de evolução do quartzo com base nas diferentes associações minerais do depósito SJ.

A evolução textural do quartzo está diretamente relacionada às atividades hidrotermais que afetaram as rochas do GSJJ e pode ser dividida em cinco estágios: 1º – a superfície do Qz1, ainda preservado e luminescente, fica em contato direto com os fluídos de origem magmática estando, portanto, mais susceptível a alteração do que o interior do cristal. O processo de

dissolução do cristal se inicia ao longo de suas bordas expostas ao fluído; **2º** – o Qz1 permanece sob a ação contínua dos fluídos, o processo de dissolução aumenta e zonas de fraqueza são formadas nas arestas do cristal, facilitando o seu fraturamento; **3º** – início do processo hidrotermal, onde os fluidos passam a percolar as fraturas e reagir com o Qz1, precipitando Qz2 de baixa luminescência (escuro). **4º** – marcado pelo início da sulfetação (principalmente Py), com Au associado, intenso faturamento de Qz1 e aumento na precipitação de Qz2, originando o aspecto brechóide desses cristais. **5º** – ápice da alteração hidrotermal, com intensa ação dos fluidos hidrotermais, alteração filica, sulfetação e mineralização aurífera. Este último estágio é marcado pela geração de cristais de quartzo tipicamente hidrotermais: Qz3 (zonado) e Qz4 (euédrico zonado).

A mineralização presente no depósito São Jorge é representada por sulfetos (principalmente pirita, esfalerita e calcopirita) e ouro, presente nos veios ou disseminados na rocha alterada (associações 3 e 4). Imagens por ERE e análises semiquantitativas de EDS identificaram duas gerações de ouro no depósito SJ: Au1, enriquecido em Ag (4,3 a 23,7%) e incluso ou preenchendo fraturas em cristais de pirita; Au2, enriquecido em Te (1,1 a 17,2%) e hospedado no Qz4. A metodologia envolvendo o conjunto MEV-CL é uma ferramenta complementar importante para estudos geológicos e metalogenéticos, podendo ser aplicada em estudos de quartzo de outros depósitos hidrotermais.

REFERÊNCIAS

- Almeida M.E., Ferreira A.L., Brito M.F.L., Monteiro M.A.S. 2001. Proposta de 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. (org.). Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém, SBG, v. 2, p. 57-112.
- Boggs S.Jr., Krinsley D.H., Goles G.G., Seyedolali A., Dypvik H. 2001. Identification of shocked quartz by scanning cathodoluminescence imaging. *Meteoritics & Planetary Science* (36):783-791.
- 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.
- Breiter K. & Müller A. 2009. Evolution of rare-metal granitic magmas documented by quartz chemistry. *European Journal of Mineralogy*, **21**:335-346.
- D'Lemos R. S., Kearsley A. T., Pembroke J. W., Watt G. R., Wright P. 1997. Complex quartz growth histories in granite revealed by scanning cathodoluminescence techniques. *Geological Magazine*, **134**:549-552.
- Faraco M.T.L., Carvalho J.M.A., Klein E.L. 1997. Carta metalogenética da Província Aurífera do Tapajós. *In: Costa M.L. & Angélica R.S. (coord.). Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, FINEP/SBG-Núcleo Norte, p. 423-443.
- Ferreira A.L. 2000. Grupo Jacareacanga. *In: Ferreira A.L., Almeida M.E., Brito M.F.L., Monteiro M.A.S. (org.). Geologia e Recursos Minerais da Folha Jacareacanga (SB.21-Y-B). Estados do Pará e Amazonas. Escala 1:250.000*. Brasília, CPRM, 1 CD-ROM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (Promin Tapajós).
- Ferreira A.L., Almeida M.E., Brito M.F.L., Monteiro M.A.S. (org.). 2000. *Geologia e Recursos Minerais da Folha Jacareacanga (SB.21-Y-B). Estados do Pará e Amazonas. Escala 1:250.000*. Brasília, CPRM, 1 CD-ROM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (Promin Tapajós).

- Friel J.J. 2003. *X-Ray and image analysis in electron microscopy*. 2nd. Princeton Gamma-Tech., 88 p.
- Hogan J.P. 1993. Monomineralic glomerocrysts: Textural evidence for mineral resorption during crystallization of igneous rocks. *Journal of Geology*, **101**:531-540.
- Jacamon F. & Larsen R.B. 2009. Trace element evolution of quartz in the charnockitic Kleivan granite, SW-Norway: The Ge/Ti ratio of quartz as an index of igneous differentiation. *Lithos*, (102):281-291.
- 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).
- Klein E.L., Santos R.A., Fuzikawa K., Angélica R.S. 2001. Hydrothermal fluid evolution and structural control of the Guarim mineralization, Tapajós Province, Amazonian craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, **36**(2):149-164.
- Lamarão C.N. & Dall'Agnol R. 2002. Granitóides São Jorge Antigo e São Jorge Jovem: petrografia e geoquímica de magmatismo cálcico-alcalino alto-K paleoproterozóico na Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. In: Klein E.L., Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. (eds.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém, SBG-NO, v. 3, p. 53-66.
- 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., 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., Rocha K.K.N., Marques G.T., Borges R.M.K. 2013. Quartzo e zircão como marcadores da evolução magmático-hidrotermal do Granito Antônio Vicente, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Carajás. *Revista do Instituto de Geociências – USP, São Paulo*, **13**(2):4-68.

- Lamarão C.N., Silva J.S., Borges R.M.K., Dall'Agnol R. 2014. Morphological and compositional variations of zircon and their metallogenic implications: the example of the Jamon, Serra dos Carajás and Velho Guilherme suites, Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, **44**(1):105-120.
- 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.
- Landtwing M.R. & Pettke T. 2005. Relationships between SEM-cathodoluminescence response and trace-element composition of hydrothermal vein quartz. *American Mineralogist*, **90**:122-131.
- Larsen R.B., Jacamon F., Kronz A. 2009. Trace element chemistry and textures of quartz during the magmatic hydrothermal transition of Oslo Rift granites. *Mineralogical Magazine*, **37**(4):691-707.
- Loomis T.P. & Welber P.W. 1982. Crystallization processes in the Rocky Hill granodiorite Pluton, California: An interpretation based on compositional zoning of plagioclase. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **8**(14):230-239.
- Melo A.F.F., Andrade A.F., Yamaguti H.S., Oliveira J.R., Carmona J.R.M., D'antona R.J.G., Lopes R.C. 1980. *Projeto Tapajós-Sucunduri*. CPRM/DNPM, v. 1, p. 1-356.
- Müller A. 2000. *Cathodoluminescence and characterization of defect structures in quartz with applications to the study of granitic rocks*. Unpubl. Ph.D. Thesis, University Göttingen, 230 p.
- Müller A., Breiter K., Seltnann R, Pécskay Z. 2005. Quartz and feldspar zoning in the eastern Erzgebirge volcano-plutonic complex (Germany, Czech Republic): evidence of multiple magma mixing. *Lithos*, **80**:201-227.
- Müller A., Kronz A., Breiter K. 2002. Trace elements and growth pattern in quartz: a fingerprint of the evolution of the subvolcanic Podlesí Granite System (Krusné Hory, Czech Republic). *Bulletin of Czech Geological Survey*, **77**:135-145.

Müller A., Seltmann R., Behr H-J. 2000. Application of cathodoluminescence to magmatic quartz in a tin granite-case study from the Schellerhau granite Complex, Eastern Erzgebirge, Germany. *Mineralium Deposita*, **35**:169-18.

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, 614 p.

Quadros M.L.E.S., Bahia R.B.C., Klein E.L., Vasquez M.L., Almeida M.E., Ricci P.S.F. 1999. As intrusões básicas da Província Mineral do Tapajós (PMT) e possibilidades de mineralizações associadas. *In: 6º Simpósio de Geologia da Amazônia*. Manaus, *Anais*, p. 567-569.

Reed S.J.B. 1996. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. Cambridge University Press, 201p.

Ricci P.S.F., Vasquez M.L., Santos A., Klein E.L., Jorge João X.S., Martins R.C. 1999. Suíte Intrusiva Creporizão – Província Tapajós: proposta e critérios de definição. *In: 6º Simpósio de Geologia da Amazônia*, *Anais*, p. 519-522.

Rusk B.G. & Reed M.H. 2002. Scanning electron microscope - cathodoluminescence analysis of quartz reveals complex growth histories in veins from the Butte porphyry copper deposit, Montana. *Geology*, **30**(8):727-730.

Rusk B.G., Lowers H.A., Reed M.H. 2008. Trace elements in hydrothermal quartz: Relationships to cathodoluminescent textures and insights into vein formation. *The Geological Society of America*, **36**(7):547-550.

Rusk B.G., Reed M.H., Dilles J.H., Kenti A.J.R. 2006. Intensity of quartz cathodoluminescence and trace-element content in quartz from the porphyry copper deposit at Butte, Montana. *American Mineralogist*, (91):1300-1312.

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 Simpósio de Geologia da Amazônia*. Belém, *Anais*.

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 and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, **3**:453-488.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., McNaughton N.J., Fletcher I.R. 2001. 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 South American Earth Science*, **15**:409-429.

Santos J.O.S., Van Breemen O. B., Groves D.I, Hartmann L.A., Almeida M.E., McNaughtonc N.J., Fletcher IR. 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*, **13**:73-109.

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

Slaby E., Götze J., Wörner G., Wrzalik R., Smigieski M. 2008. K-feldspar phenocrysts in microgranular magmatic enclaves: a cathodoluminescence and geochemical study of crystal growth as a marker of magma mingling dynamics. *Lithos*, **105**:85-97.

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

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. p. 471-485.

Vasquez M.L. & Klein E.L. 2000. *Geologia e recursos minerais da Folha Rio Novo - SB.21 - Z- C, Estado do Pará*: Nota explicativa. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós. Brasília, CPRM, PROMIM Tapajós, escala 1:250.000. 1 CD-Rom.

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*. Simpósio Brasileiro de Geologia. Belém, v. 3, p. 67-84.

Vasquez L.V., Rosa-Costa L.R., Silva C.G., Ricci P.F., Barbosa J.O., Klein E.L., Lopes E.S., Macambira E.B., Chaves C.L., Carvalho J.M., Oliveira J.G., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. *In: Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. (orgs.). Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas - SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.*

Vasyukova O.V., Kamenetsky V.S., Goemann K., Davidson P. 2013. Diversity of primary CL textures in quartz from porphyry environments: implication for origin of quartz eyes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **166**:1253-1268.

Wark D.A. & Watson E.B. 2006. The TitaniQ: a Titanium-in-Quartz Geothermometer. *Contributions to Mineral Petrology*, (152):743-754.

Wiebe R.A., Wark D.A., Hawkins D.P. 2007. Insights from quartz cathodoluminescence zoning into crystallization of the Vinalhaven granite, coastal Maine. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **154**:439-453.

Wilkinson J.J., Boyce A.J., Earls G., Fallick A.E. 1999. Gold remobilization by low temperature brines: Evidence from the Curraghinalt gold deposit, northern Ireland: *Economic Geology*, (94): 289-296.