

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO DOS FLUIDOS FORMADORES DAS ALTERAÇÕES
HIDROTERMAIS E DA MINERALIZAÇÃO DE OURO E COBRE DA
MINA DO PALITO, PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS (PA)

Gustavo de Lima Usero

Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani
Co-orientador: MSc. Carlos Mario Echeverri Misas

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 20)

SÃO PAULO
2011

TF
U84
GL.e

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO DOS FLUIDOS FORMADORES DAS ALTERAÇÕES
HIDROTERMAIS E DA MINERALIZAÇÃO DE OURO E COBRE DA
MINA DO PALITO, PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS (PA)

Gustavo de Lima Usero



Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani
Co-orientador: MSc. Carlos Mario Echeverri Misas

DEDALUS - Acervo - IGC



30900030329

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 20)

SÃO PAULO
2011

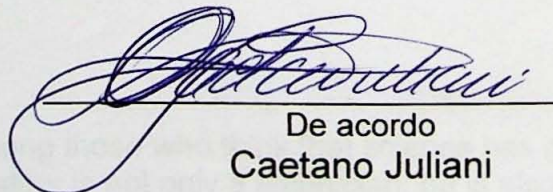
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO DOS FLUIDOS FORMADORES DAS ALTERAÇÕES
HIDROTERMAIS E DA MINERALIZAÇÃO DE OURO E COBRE DA
MINA DO PALITO, PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS (PA)

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 20)



De acordo
Gustavo de Lima Usero



De acordo
Caetano Juliani

SÃO PAULO
2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Cristiano Junior, que durante o desenvolvimento do meu trabalho de Iniciação Científica, e posteriormente o Trabalho de Formatura, se tornou um grande amigo, me guiando com muita sabedoria no tão vasto e desafiador universo acadêmico. As lições aprendidas com este grande mestre me acompanharão durante toda a vida. Também sou muito grato pela equipe de apoio do SGG em 2010, e em parte do qual foi criado o SGG Student Chapter USP.

Agradeço à Dra. Rosa Maria de Souza Sato que durante minha Iniciação Científica, me ensinou todos os aspectos da análise de estruturas cristalinas, partindo dos conceitos mais elementares ao mapeamento de mapas, e posteriormente aquisição de dados e interpretações. Também agradeço pelas boas conversas e risadas. Estou lhe devendo algumas cervejas em Granada.

Agradeço aos meus pais João e Lucélia, e meus irmãos Raphael e Daniel, pela confiança, apoio e incentivo, os quais foram fundamentais para a conclusão desta etapa da minha vida.

Aos amigos da USP, e da fora da USP, pelos momentos de descontração, momentos que são de extrema importância para o desenvolvimento de qualquer ciência.

A todos os colegas do SGG Student Chapter USP, e a todos os parceiros que contribuíram para a criação deste grupo. Vida longa ao nosso grupo!

A Profa. Dra. Liana Virginia Soares Monteiro por todos os conselhos e sugestões no trabalho, e também pela grande ajuda com os assuntos MCV e Raman. Boa tarde para a USP.

Ao Instituto de Geociências da USP, e a todos os docentes e funcionários que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação.

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo 301302/2008-2, Coordenador Roberto Delgado, pelo apoio financeiro à esta pesquisa, e ao Programa de Pós-graduação em Física, sob orientação do Prof. Dr. Cristiano Junior.

"I am among those who think that science has great beauty. A scientist in his laboratory is not only a technician: he is also a child placed before natural phenomena which impress him like a fairy tale."

Marie Sklodowska Curie

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Caetano Juliani, que durante o desenvolvimento do meu trabalho de Iniciação Científica, e posteriormente o Trabalho de Formatura, se tornou um grande amigo, me guiando com muita sabedoria no, até então desconhecido, universo acadêmico. As lições aprendidas com este grande mestre me acompanharão durante toda a vida. Também sou muito grato pelo convite de acompanhá-lo no SIMEXMIN 2010, a partir do qual foi criado o SEG Student Chapter USP.

Agradeço à Dra. Rosa Maria da Silveira Bello que durante minha Iniciação Científica, me ensinou todas as etapas da análise de inclusões fluidas, partindo dos conceitos mais elementares ao mapeamento de campos, e posteriormente aquisição de dados e interpretações. Também agradeço pelas boas conversas e risadas. Estou lhe devendo algumas cervejas em Gramado.

Agradeço aos meus pais João e Lucélia, e meus irmãos Raphael e Danyel, pela confiança, apoio e incentivo, os quais foram fundamentais para a conclusão desta etapa da minha vida.

Aos amigos da USP, e de fora da USP, pelos momentos de descontração, momentos que são de extrema importância para o desenvolvimento de qualquer atividade.

A todos os colegas do SEG Student Chapter USP, e a todas as pessoas que contribuíram para a criação deste grupo. Vida longa ao nosso grupo!

À Profa. Dra. Lena Virginia Soares Monteiro por todas as contribuições e sugestões ao trabalho, e também pela grande ajuda com as análises MEV e Raman. Seja bem-vinda à USP.

Ao Instituto de Geociências da USP, e a todos os docentes e funcionários que contribuíram diretamente ou indiretamente para a minha formação.

Aos projetos CT-Mineral/MCT/CNPq, Nº 027/2004. Coordenador: Caetano Juliani, e MCT/CNPq/FAPESPA/PETROBRAS, Processo: 573733/2008-2. Coordenador: Roberto Dall'Agnol, pelo apoio financeiro à esta pesquisa, e ao Programa Santander Universidades pela concessão de bolsa de iniciação científica.

RESUMO

A Província Aurífera do Tapajós (PAT) caracteriza-se por uma expressiva produção de ouro em garimpos, que pode ter alcançado mais 750 toneladas. Apesar disso, poucos depósitos de ouro primário são conhecidos na PAT, e dentre esses, somente alguns tiveram a definição de um modelo genético.

As mineralizações de Au da PAT são, principalmente, filonianas do tipo orogênico mesotermal (*orogenic lode gold*), mas também são descritas mineralizações auríferas e de metais de base magmático-hidrotermais epitermais (*high-* e *low-sulfidation*) e do tipo pórfiro, associadas aos arcos magmáticos paleoproterozóicos Cuiú-Cuiú e Parauari. A mineralização auro-cuprífera da Mina do Palito tem sido descrita como filoniana orogênica, ou como magmática-hidrotermal do tipo pórfiro. Uma vez que os fluidos mineralizantes em sistemas hidrotermais orogênicos são distintos dos magmático-hidrotermais, o estudo das inclusões fluidas dos veios de quartzo mineralizados, e de cristais de quartzo associados à alteração hidrotermal potássica, são fundamentais para a definição de um modelo genético para a mineralização.

As análises de inclusões fluidas indicam salinidades variáveis, mas bastante elevadas (17,2 a 67,5 em peso eq. de NaCl), e temperaturas de aprisionamento atingindo 570 °C para os fluidos relacionados à alteração hidrotermal potássica. As soluções mineralizantes, representadas pelas inclusões fluidas presentes nos veios de quartzo mineralizados, possuem salinidades bastante variáveis (0,3 a >23,8 em peso eq. de NaCl), com desenvolvimento de processos de *boiling*, e interação de fluidos magmáticos com fluidos meteóricos.

Os dados coletados durante esta pesquisa comprovam que os fluidos responsáveis pelo desenvolvimento das alterações hidrotermais e pela mineralização do Granito Palito mineralizantes da Mina do Palito foram formados em um sistema magmático-hidrotermal, caracterizando a mineralização como sendo do tipo pórfiro.

ABSTRACT

The Tapapós Gold Province (TGP) is one of the most important sources of gold in Brazil. It is estimated that, over the years, the gold amount produced by prospectors has been about 750 t. Despite this expressive production, TGP's primary gold deposits are not well-known. Additionally, very few studies related to definition of the genesis of TGP's gold deposits have been developed.

The gold mineralization of the TGP is mainly classified as orogenic lode gold, but epithermal (high- and low-sulfidation) and porphyry-type deposits are also recognized. The magmatic-hydrothermal Au mineralizations are associated to Cuiú-Cuiú and Parauari Paleoproterozoic magmatic arcs. The gold and copper mineralization of the Palito Gold Mine has been classified either as orogenic lode gold or as porphyry-type. Once fluids of orogenic systems are much different from those of magmatic systems, fluid inclusion studies were used to determinate the fluid's characteristics and therefore, the geological processes related to genesis of the mineralization.

The analysis of fluid inclusions related to the potassic hydrothermal alteration indicated high salinity that varies from 17,2 to 67,5 wt % NaCl and also high trapping temperatures (570 °C). The mineralizing fluids that are trapped in the mineralized quartz veins have a wide range of salinities (0,3 to >23,8 wt % NaCl), the data indicate boiling processes and interaction between magmatic and meteoric fluids. The data collected at this study indicate evolution of fluids of a magmatic-hydrothermal system, which were responsible by the development of hydrothermal alterations and mineralization. Thus, the Palito mine mineralization can be classified as a porphyry-type mineralization.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	4
1. LOCALIZAÇÃO E PRINCIPAIS ACESSOS	5
2. JUSTIFICATIVA PARA A PESQUISA.....	6
3. OBJETIVOS	6
4. DIFICULDADES ENCONTRADAS	7
5. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
5.1. Conceitos Sobre Inclusões Fluidas	8
5.1.1. Breve histórico	8
5.1.2. Aplicações.....	8
5.1.3. Aprisionamento dos fluidos	9
5.1.4. Composição	10
5.1.5. Fases	10
5.1.6. Sistema constituído por água.....	10
5.1.7. Inclusões aprisionadas a partir de sistemas heterogêneos	12
5.2. Geologia Regional	12
5.3. Geologia Local.....	14
5.3.1. Granito Palito	15
5.3.2. Minério de Au-(Cu).....	16
6. MATERIAIS E MÉTODOS	18
6.1. Petrografia da alteração potássica.....	19
6.2. Microtermometria	20
6.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	22
6.4. Espectroscopia Raman	22
7. RESULTADOS OBTIDOS	23
7.1. Veios Mineralizados.....	23
7.2. Alteração Potássica	28
8. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS	32
8.1. Alteração Potássica	34
8.1.1. Amostra CJ-81	34
8.1.2. Amostra CJ-36B.....	39
8.2. Veios Mineralizados.....	41
8.2.1. Evidências de boiling e de mistura de fluidos	42
8.2.2. Modificação das inclusões fluidas por escape de fluidos.....	45
8.2.3. Evidências de aprisionamento de fluidos exsolvidos do magma em cristalização.....	45
9. CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

INTRODUÇÃO

Durante a última década, tem sido observado um acelerado aumento do preço do ouro no cenário mundial, passando de \approx US\$ 10/g em 2003 para \approx US\$ 60/g em setembro de 2011 (**Fig. 1A**), com uma valorização de 2486% entre 1973 e outubro de 2011 (**Fig. 1B**). Grande parte do ouro produzido é utilizada como lastro de moedas, e na indústria de jóias, mas há importantes aplicações na indústria eletrônica, a qual também contribui para a valorização do metal, além destes fatores, a crise financeira de 2008 e a instabilidade do mercado de ações alavancaram a procura de ouro como investimento, por se tratar de uma opção bastante conservadora.

A acelerada valorização do metal, ao longo da última década, tem levado empresas a uma nova corrida do ouro, com busca por novas reservas, e também por ampliação das reservas já conhecidas, principalmente em países que dispõem de grande potencial mineral, mas carecem de pesquisas relacionadas à origem e localização das mineralizações auríferas primárias, caso do Brasil.

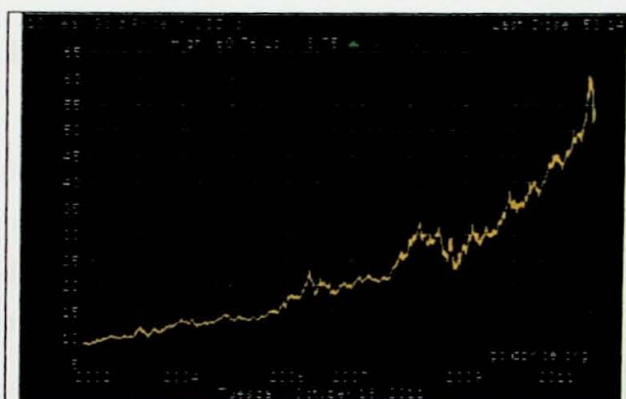


Figura 1A. Evolução no preço do ouro (US\$/g) no período de 1992 a outubro de 2011.
Fonte: www.goldprice.org

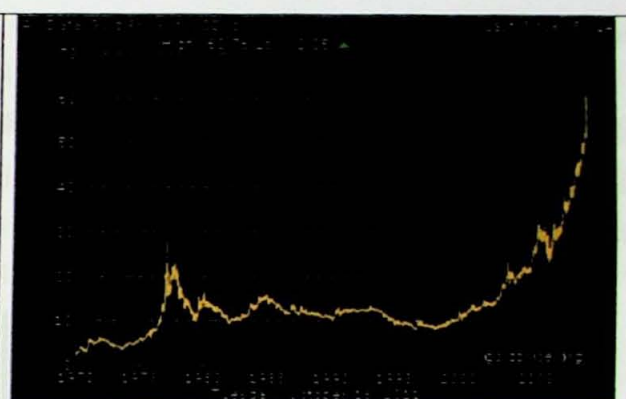


Figura 1B. Evolução no preço do ouro (US\$/g) no período de 1973 a outubro de 2011.
Fonte: www.goldprice.org

A Província Aurífera do Tapajós (PAT) caracteriza-se por uma expressiva produção de ouro em garimpos, que pode ter alcançado mais de 750 toneladas ao longo das últimas décadas. Apesar da produção bastante expressiva em garimpos, poucos depósitos de ouro primário são conhecidos na Província, e dentre esses, somente alguns tiveram a definição de um modelo genético para a mineralização. Uma vez que os modelos genéticos são fundamentais para o desenvolvimento de modelos prospectivos, os estudos relacionados à gênese das mineralizações são essenciais para o conhecimento do potencial mineral, especialmente para ouro e metais de base, da PAT.

As mineralizações auríferas primárias da PAT são classificadas principalmente como filonianas orogênicas mesotermiais formadas em zonas de cisalhamento, geralmente associadas a granitóides. São descritas também mineralizações epigenéticas associadas a

rochas básicas intrusivas, rochas metassedimentares, unidades vulcano-sedimentares, e também associadas a granitóides. Mais recentemente foram identificadas mineralizações auríferas e de metais de base típicas de arcos magmáticos, tanto epitermais *high-* e *low-sulfidation* nas vulcânicas do Grupo Iriri, como do tipo pórfiro em granitos tardios da Suite Intrusiva Parauari (Juliani *et al.*, 2002; 2005). Estas descobertas sugerem potencialidade para ocorrência de depósitos de classe mundial, além dos filonianos, na PAT.

1. LOCALIZAÇÃO E PRINCIPAIS ACESSOS

A Mina do Palito pertence à empresa Serabi Mineração, a qual possui ações nas bolsas de Londres e Toronto, e está localizada na porção oeste do Estado do Pará – Brasil, região sudeste do município de Itaituba (Fig. 2), próximo às vilas Jardim do Ouro e Moraes Almeida, e à foz do Rio Novo, o qual é o principal afluente do rio Jamanxim. As principais estradas da região são a BR-163 (Cuiabá-Santarém) e a Transgarimpeira (Fig. 3). O município mais estruturado e próximo da Mina do Palito é o município de Itaituba e o acesso à Mina pode ser feito por estradas, utilizando-se a BR-163 e a Transgarimpeira, ou por via aérea, em monomotor fretado, até o Jardim do Ouro.

As atividades de exploração da Mina do Palito foram iniciadas no final de 2003, sendo esta mina o primeiro empreendimento empresarial, além da primeira mina subterrânea instalada na PAT. A Mina do Palito está atualmente com a produção interrompida, mas estudos de reavaliação de seu potencial estão em andamento.

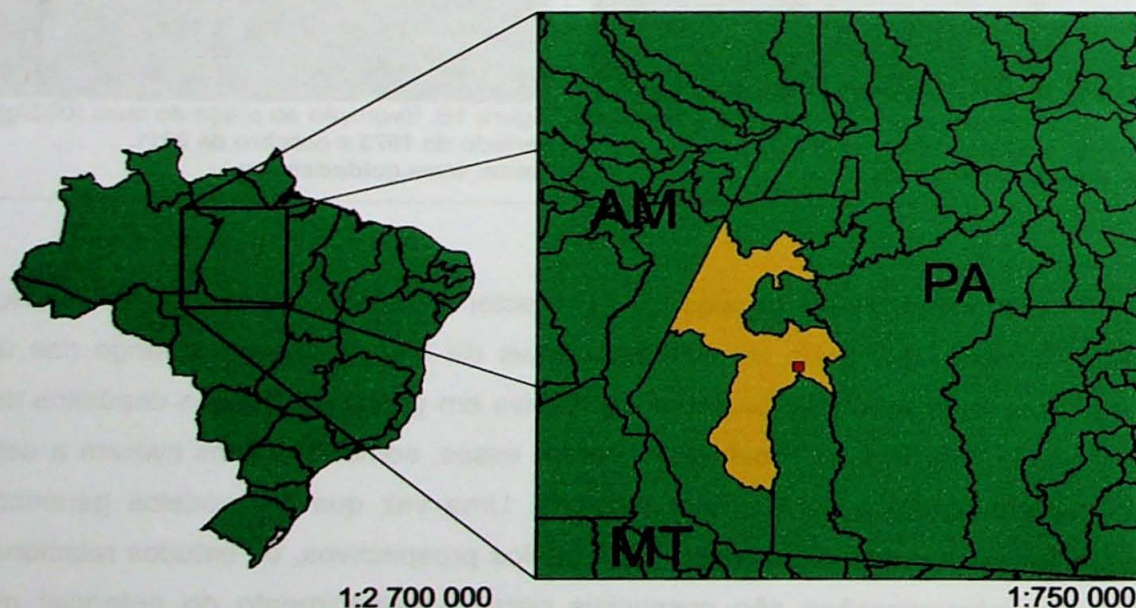


Figura 2. Mapa de localização da Mina do Palito, com o município de Itaituba destacado em amarelo. A Mina do Palito localiza-se dentro do quadrado vermelho.

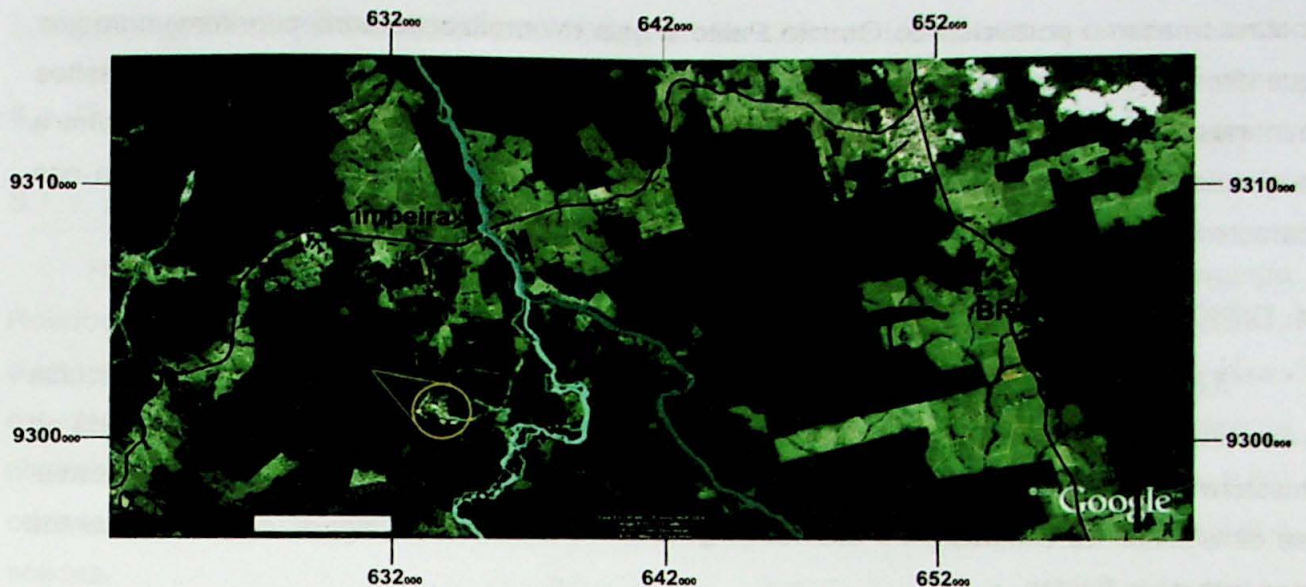


Figura 3. Imagem raster de satélite com localização da Mina do Palito indicada pelo círculo amarelo. Destacam-se os principais acessos para a região: BR-163, Transgarimpeira, além do rio Jamaxim e Rio Novo. Imagem extraída do Google Earth.

2. JUSTIFICATIVA PARA A PESQUISA

A mineralização auro-cuprífera da Mina do Palito tem sido interpretada por consultores da mina, como filoniana orogênica (*orogenic lode gold*) associada a zonas de cisalhamento, entretanto, os tipos, estilos e zonamento da alteração hidrotermal são distintos daqueles presentes em filões orogênicos, e são análogos aos observados em níveis mais profundos de sistemas magmático-hidrotermais do tipo pórfiro (*porphyry-type*).

Uma vez que os fluidos geradores de mineralizações em sistemas orogênicos apresentam características distintas dos fluidos formadores de mineralizações em sistemas magmático-hidrotermais do tipo pórfiro, o estudo de tais fluidos, representados pelas inclusões fluidas presentes nos veios de quartzo mineralizados, e das inclusões fluidas presentes nos cristais de quartzo formados durante a alteração hidrotermal potássica (metassomatismo potássico), torna-se imprescindível para a caracterização dos processos geológicos envolvidos na mineralização de ouro e cobre da mina. Deste modo, o desenvolvimento de um modelo genético para esta mineralização é muito importante para definição do potencial para ocorrência de depósitos de ouro, cobre e metais de base de grande volume e baixo teor na PAT.

3. OBJETIVOS

O desenvolvimento desta pesquisa é resultado da necessidade do conhecimento do potencial mineral da Província Aurífera do Tapajós, uma vez que há poucos estudos de caracterização das mineralizações primárias da PAT. A partir do estudo das inclusões fluidas objetivou-se caracterizar os fluidos e os processos responsáveis pelo

metassomatismo potássico do Granito Palito e pela mineralização auro-cuprífera, uma vez que diferentes processos e ambientes geológicos resultam em tipos diferentes de depósitos minerais, cada qual com características distintas. Desta forma, é objetivo deste trabalho a sugestão de um modelo genético para a mineralização da Mina do Palito, com base nas características e nas composições das inclusões fluidas.

4. DIFICULDADES ENCONTRADAS

As principais dificuldades encontradas durante o desenvolvimento desta pesquisa relacionam-se à obtenção de dados por microespectroscopia Raman, a qual foi realizada no Instituto de Geociências da UNICAMP. Por meio da microespectroscopia Raman, esperava-se determinar às composições das fases gasosas e também de alguns sólidos presentes nas inclusões fluidas.

O primeiro aspecto é que análises Raman só podem ser realizadas após os trabalhos de mapeamento e resfriamento das amostras, para que fossem suas características fossem conhecidas e, desta forma, pudessem ser selecionadas as inclusões fluidas a serem analisadas. Associado a este fato, o aquecimento das amostras, que da mesma forma que o resfriamento, é essencial para a determinação das características das inclusões fluidas, e não podia ser executado antes da realização do Raman, pois o aquecimento, de modo geral, causa a crepitação das amostras, não sendo então possível determinar às composições das fases gasosa e sólida das inclusões.

O principal problema relacionado às análises microespectroscopia Raman deveu-se a imprecisões na calibração do equipamento, a qual é realizada pelo responsável técnico do laboratório. Por decorrência destas imprecisões de calibração, não foi possível determinar as composições das inclusões fluidas, uma vez que o equipamento detectava apenas a presença do mineral hospedeiro das inclusões (quartzo), mas não foi capaz de detectar as fases gasosas e sólidas presentes nas inclusões.

Pelo exposto, o uso do método microespectroscopia Raman não teve o resultado esperado nesta pesquisa, mas de modo geral, não comprometeu a qualidade dos estudos, uma vez que este método forneceria informações adicionais bastante específicas. Dessa forma estes estudos fundamentaram-se apenas na microtermometria.

5. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. Conceitos Sobre Inclusões Fluidas

5.1.1. Breve histórico

Há muito tempo observa-se a presença de fluidos aprisionados em minerais. Segundo Roedder (1972) a existência de inclusões fluidas (IFs) tem sido registrada desde o século IV e as tentativas de estudá-las tiveram início na primeira metade do século XIX. Dentre esses estudos, destaca-se o trabalho de Sorby (1858, em Touret 1984), no qual o autor apresenta diversos desenhos ilustrativos de cavidades presentes em minerais de rochas ígneas, e em cristais artificiais, cavidades as quais são preenchidas por fases fluidas ou fases fluidas e sólidas.

Sorby (1858, em Touret 1984) foi o primeiro pesquisador a propor a utilização de IFs presentes em minerais como potencial geotermômetro, aventando a hipótese de que os fluidos heterogêneos, aprisionados nas cavidades, teriam sido originalmente homogêneos, e as bolhas (gases e/ou vapor d'água) atualmente observadas resultariam da maior contração do líquido em relação ao mineral hospedeiro, durante o resfriamento dos minerais. Sorby (1858, em Touret 1984) propõe que o aquecimento das IFs até a homogeneização total das várias fases representaria a reversão do processo de resfriamento dos fluidos, e a temperatura necessária para a homogeneização total representaria a temperatura mínima de formação do mineral hospedeiro.

Deve ser considerado que a altas temperaturas a miscibilidade entre os vários componentes das inclusões é elevada e apenas a partir de modificações nessas condições iniciais, ou seja, com a diminuição das condições de pressão e temperatura, resultantes do soerguimento e resfriamento das rochas, é que haveria a separação das fases.

Apesar das primeiras observações acerca das IFs remontarem a épocas muito antigas, apenas a partir dos anos 60 o estudo dos fluidos aprisionados em minerais adquiriu maior expressão, com importantes publicações nos anos 80, ressaltando-se os trabalhos de Hollister & Crawford (1981), Roedder (1984) e Shepherd *et al.* (1985). O avanço na ciência das IFs foi devido ao surgimento de novas técnicas instrumentais analíticas, além da constatação da importância do estudo dos fluidos para a resolução de inúmeros problemas geológicos. Touret (1974) relaciona o desenvolvimento dos estudos das IFs com o interesse dos pesquisadores na melhor compreensão das características dos fluidos e processos envolvidos na formação de depósitos minerais.

5.1.2. Aplicações

Como os fluidos aprisionados constituem registros das diferentes etapas de evolução das rochas, os estudos destes fluidos podem fornecer importantes contribuições ao

conhecimento dos ambientes geológicos nos quais as rochas foram formadas, conforme discutido por Roedder (1984). Ainda, segundo o autor, o estudo das IFs tem grande importância na aquisição de dados relativos às características químicas e físico-químicas dos fluidos tais como composição, densidades, salinidades, temperatura mínima e pressão de aprisionamento, permitindo também a compreensão de aspectos relativos à sua interação com as rochas encaixantes.

5.1.3. *Aprisionamento dos fluidos*

Inclusões fluidas correspondem a cavidades em um determinado mineral, preenchidas por um ou mais fluidos (líquido, vapor d'água, gás ou fluido supercrítico), podendo conter sólidos como minerais de saturação (*daughter minerals*), cristalizados após o aprisionamento do fluido hipersalino, ou minerais ocasionais, formados antes do aprisionamento dos fluidos. Estes fluidos podem ter origens e composições bastante variadas e ficam retidos como inclusões durante os processos de cristalização, recristalização e cicatrização de fraturas dos minerais hospedeiros (Roedder, 1982; 1984; Shepherd *et al.*, 1985).

Segundo Shepherd *et al.* (1985), existem três tipos de IFs relacionados à cristalização ou recristalização do mineral hospedeiro, quais sejam:

a) *Inclusões fluidas primárias*

As IFs primárias são compostas pelos fluidos presentes durante a geração dos minerais originais e têm a mesma, ou composição bastante semelhante, à do fluido que originou o mineral. Geralmente distribui-se em arranjo não ordenado no mineral.

b) *Inclusões fluidas secundárias*

A distribuição típica destas inclusões é ao longo de trilhas que cortam todo o cristal, e são formadas por processos de cicatrização de fraturas nos minerais. Os fluidos que geram a cicatrização das fraturas têm, em geral, características distintas dos fluidos que geraram o mineral hospedeiro.

c) *Inclusões fluidas pseudo-secundárias*

São inclusões formadas a partir da cicatrização de fraturas formadas durante o crescimento do cristal, as quais são preenchidas pelo líquido circundante ao mineral à época de sua cristalização. Também constituem trilhas, mas estas não cortam todo o cristal. O fluido tem a mesma composição, ou composição bastante semelhante à do fluido das inclusões primárias.

5.1.4. Composição

Grande parte das IFs é composta por líquidos de baixa viscosidade e uma bolha de gás/gases e/ou vapor d'água. O líquido é geralmente composto por solução aquosa com quantidades variáveis de solutos, cujas concentrações geralmente variam entre próximo a 0 e 50%. Os solutos são constituídos predominantemente por Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- e $(\text{SO}_4)^{2-}$, em maiores quantidades, juntamente com outros íons em menor volume. Em geral, os íons Na^+ e o Cl^- são os mais abundantes nestas nas soluções aquosas.

O CO_2 pode ocorrer como líquido ou como gás, podendo predominar sobre a solução aquosa. O CH_4 também pode estar presente em muitas inclusões fluidas.

A bolha pode ser constituída por vapor d'água ou por um gás altamente comprimido, mais comumente o CO_2 , mas também podem ocorrer subordinadamente outros voláteis que estavam originalmente dissolvidos no fluido aprisionado, destacam-se o CH_4 , N_2 e H_2S , dentre outros.

Sólidos podem estar presentes, sendo comuns os sólidos de saturação (*daughter minerals*), formados após o aprisionamento, a partir de inclusões com soluções hipersalinas. Esses são representados predominantemente pela halita (NaCl) e subordinadamente pela silvita (KCl). Também pode haver sólidos formados previamente ao aprisionamento.

5.1.5. Fases

As IFs podem ser monofásicas, bifásicas, trifásicas ou polifásicas, dependendo do número de fases (líquido, vapor, gás ou sólido) à temperatura ambiente.

5.1.6. Sistema constituído por água

Sistemas compostos por água pura são sistemas ideais e não ocorrem na natureza, mas os dados obtidos a partir de estudos experimentais desse sistema são de grande valia para o estudo das IFs e serão aqui apresentados devido à grande importância dos dados disponíveis na literatura acerca deste sistema, os quais muito contribuíram com a interpretação dos dados e conclusões apresentadas neste trabalho.

Nos sistemas constituídos por água, o diagrama T-d (**Fig. 4**) exhibe a denominada curva de homogeneização, a qual separa o campo de estabilidade de uma única fase (acima da curva) do campo de coexistência de duas fases, líquido e vapor (abaixo da curva).

Uma inclusão aprisionada a partir de um sistema homogêneo, com o decréscimo da temperatura e pressão entrará no campo de coexistência de duas fases (Shepherd *et al.*, 1985).

Segundo Sorby (1858, em Touret 1984), o inverso do procedimento, isto é, o aquecimento, fará com que a inclusão se homogeneize quando ultrapassar a curva de homogeneização, sendo a temperatura registrada, a temperatura mínima de

aprisionamento, pois a inclusão pode ser sido aprisionada em qualquer temperatura acima da curva de homogeneização.

De acordo com Shepherd *et al.* (1985), Um fluido de alta densidade aprisionado numa inclusão em condições de altas pressões (**Fig.4, inclusão A**), ao ultrapassar a curva de homogeneização, devido à diminuição da temperatura, desenvolve uma pequena bolha de vapor que, apesar de aumentar de tamanho com o resfriamento subsequente, permanece com pequenas dimensões até a temperatura ambiente. Ao ser aquecida, a partir da temperatura ambiente, terá sua bolha de vapor diminuída, homogeneizando-se para o estado líquido.

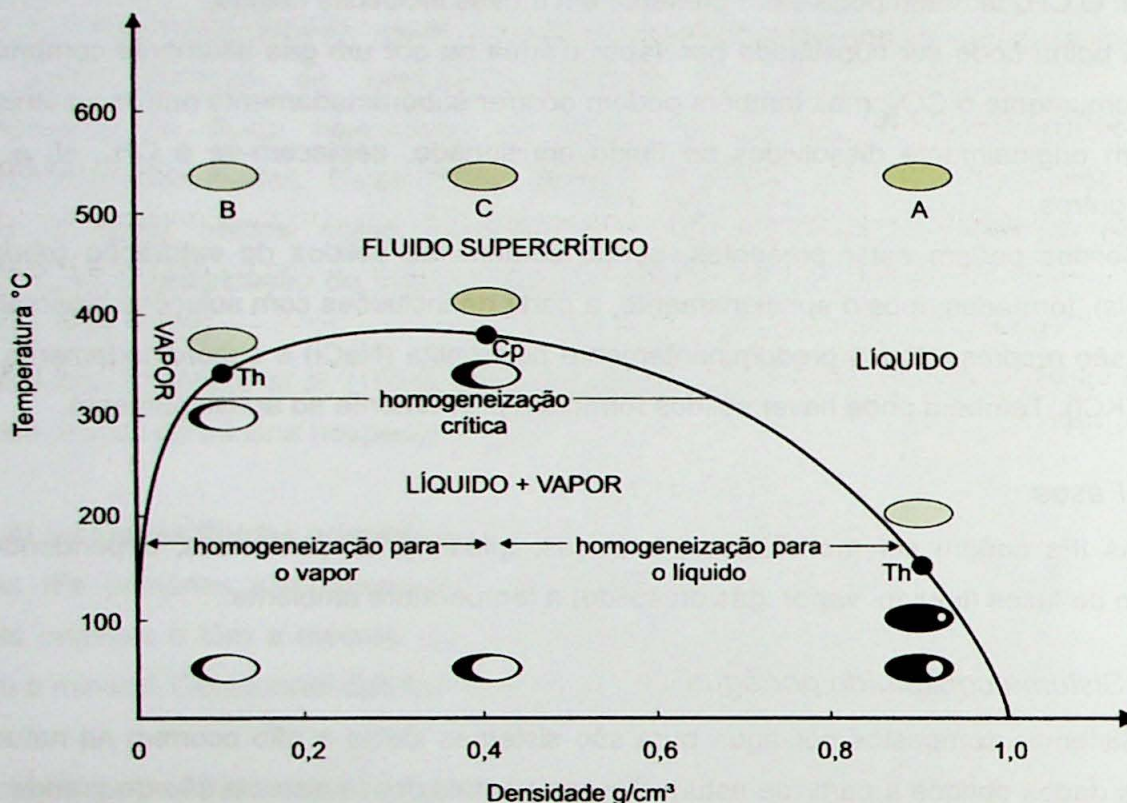


Figura 4. Diagrama temperatura–densidade para água pura, representando os principais tipos de homogeneização para inclusões com alto, média e baixa densidades, aprisionadas à mesma temperatura, mas a diferentes pressões (T_1 : temperatura de aprisionamento; T_H : temperatura de homogeneização; c.p.: ponto crítico; A, B e C inclusões fluidas esquemáticas. Extraído de Shepherd *et al.* (1985).

A inclusão **B** da **Figura 4**, aprisionada em baixas pressões (sendo, portanto, de baixa densidade), desenvolverá uma película de líquido quando a temperatura ultrapassar a curva de homogeneização, durante o resfriamento. O aquecimento desta inclusão provocará o aumento da bolha e sua homogeneização ocorre para o estado vapor (Shepherd *et al.*, 1985).

De acordo com Shepherd *et al.* (1985), a inclusão **C** da **Figura 4**, representa aprisionamento em pressões intermediárias, com o resfriamento desenvolver-se-ão fases bem distintas (L+V), numa proporção constante até a temperatura ambiente. O aquecimento da inclusão leva ao desaparecimento gradual do menisco que separa as fases, sem mudanças no volume da bolha. A homogeneização ocorre para o estado crítico.

Este diagrama representa, esquematicamente, os tipos de inclusões que são aprisionadas em zonas de variação de pressão

5.1.7. Inclusões aprisionadas a partir de sistemas heterogêneos

Segundo Shepherd *et al.* (1985), quando o aprisionamento das inclusões ocorre abaixo da curva de *solvus* (curva de imiscibilidade), podem ocorrer inclusões representativas das duas fases ou contendo proporções variáveis de ambas as fases. Logo, é comum se observar em inclusões aprisionadas a partir de um sistema heterogêneo de fluidos, razões distintas entre as fases constituintes. Esta relação é de extrema importância na interpretação dos dados apresentados neste trabalho.

5.2. Geologia Regional

A província Aurífera do Tapajós (Almeida *et al.*, 1977) insere-se na porção centro-sul do Cráton Amazônico e situa-se geologicamente na porção leste da Província Ventuari-Tapajós (1,95–1,80 Ga) ou Tapajós-Parima (2,10–1,87 Ga) e na porção oeste da Província Amazônia Central (<2,5 Ga), segundo Tassinari & Macambira (1999) ou Santos *et al.* (2000; 2001) (**Fig. 5**). A maioria das mineralizações auríferas conhecidas concentra-se na porção oeste da PAT.

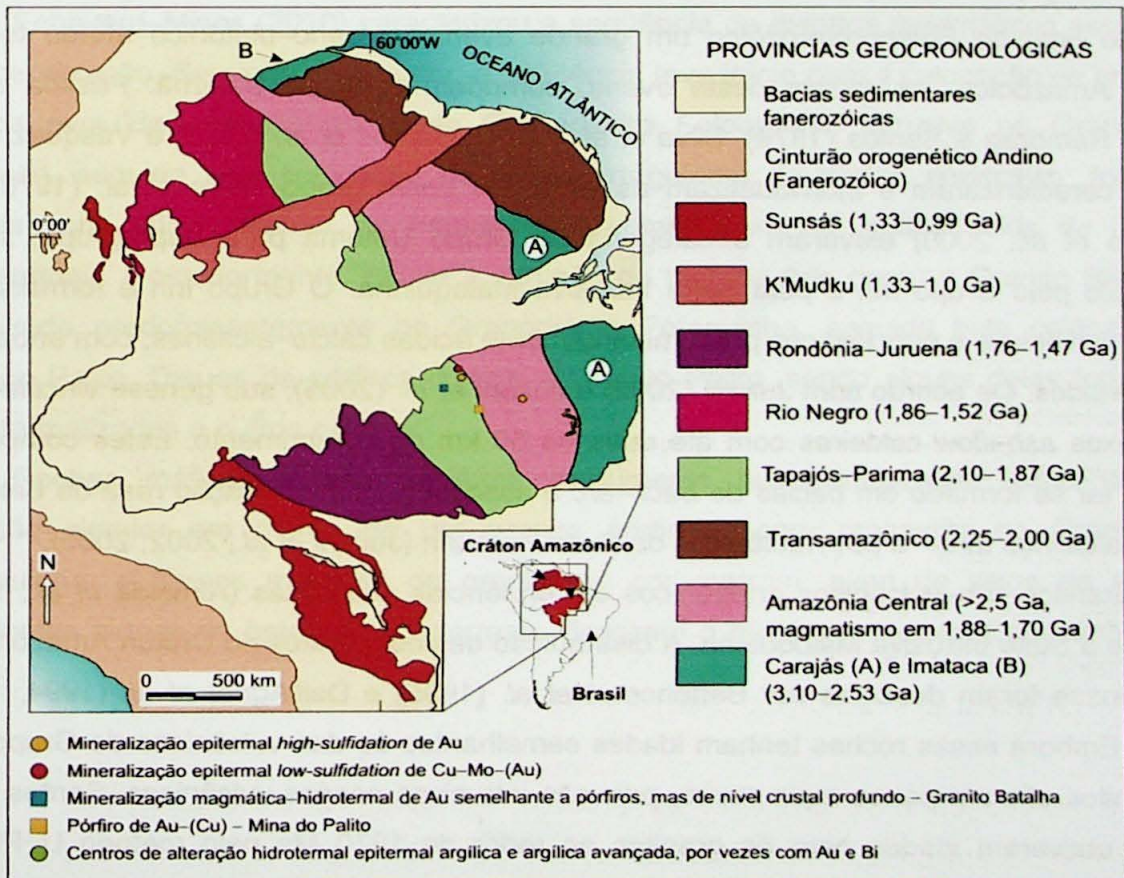


Figura 5. Principais províncias geocronológicas e tectônicas do Cráton Amazônico, segundo Santos *et al.* (2000), com a localização dos principais sistemas hidrotermais paleoproterozóicos associados ao magmatismo Uatumã. O quadrado amarelo indica a Mina do Palito.

A província Ventuari–Tajajós ou Tapajós–Parima teria sua gênese em um sistema de orogênias oceano–continente, com sedimentação, construção de arcos magmáticos cálcio–alcalinos com vulcanismo associado e, mais tardiamente, pela intrusão de granitos alcalinos anorogênicos, também com componentes vulcânicos (Santos *et al.*, 2000, Juliani *et al.*, 2005).

As unidades orogênicas são compostas pelo Grupo Jacareacanga e pelos arcos magmáticos Cuiú–Cuiú e Parauari. O Grupo Jacareacanga representa uma seqüência vulcano–sedimentar metamorfisada a baixo grau com idade de ~2,1 Ga (Ferreira *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2000) composta por micaxistos, micaxistos quartzosos, talco xisto, actinolita xisto, metargilitos, metagrauvas, *metachert*, quartzitos e filitos. O complexo Cuiú–Cuiú, representado por migmatitos, anfibolitos, gnaisses e granitóides metassomatizados (Almeida *et al.*, 1998), foi datado em 2.005 Ma por Santos *et al.* (1997). Tonalitos, granodioritos e granitos pertencentes à Suíte Intrusiva Creporizão foram introduzidos nas rochas deste complexo (Lamarão *et al.*, 1999; Ricci *et al.*, 1999; Klein & Vasquez, 2000).

A Suíte Intrusiva Parauari é composta por granitos e monzogranitos predominantes, com tonalitos e dioritos subordinados. Estes litotipos são intrusivos nas rochas do Grupo Jacareacanga, e do Complexo Cuiú–Cuiú.

No final do Paleoproterozóico um grande evento vulcano–plutônico afetou todo o Cráton Amazônico. As rochas deste evento compõem o Grupo Uatumã. Pessoa *et al.* (1977), Rambrag & Santos (1974), Silva *et al.* (1974), Santos *et al.* (1975) e Vasquez *et al.* (1999) caracterizaram e individualizam as unidades deste grupo. Melo *et al.* (1978, em Almeida *et al.*, 2000) elevaram a categoria do Grupo Uatumã para Supergrupo, sendo composto pelo Grupo Iri e pela Suíte Intrusiva Maloquinha. O Grupo Iri é formado por rochas vulcânicas e piroclásticas predominantemente ácidas cálcio–alcalinas, com andesitos subordinados. De acordo com Juliani (2002) e Juliani *et al.* (2005), sua gênese vincula-se a complexos *ash–flow* caldeiras com até mais de 50 km de comprimento. Estes complexos podem ter se formado em bacias de *back–arc* e associam-se à colocação rasa de batólitos cálcio–alcalinos tardi– a pós–tectônicos da Suíte Parauari (Juliani *et al.*, 2002; 2005).

Granitos sub–vulcânicos ortogênicos de tendências alaskíticas (Almeida *et al.*, 1977) compõe a Suíte Intrusiva Maloquinha. A distribuição destes granitos no Cráton Amazônico e sua gênese foram descritas por Bettencourt *et al.* (1995) e Dall'Agnol *et al.* (1994, 1997, 1999). Embora essas rochas tenham idades semelhantes às das vulcânicas do Grupo Iri, os granitos são um pouco mais novos, pois são intrusivos nessas vulcânicas. Santos *et al.* (2000) obtiveram idades para os granitos ao redor de 1870 Ma pelo método U–Pb em zircão.

Juliani *et al.* (2005) consideram que as rochas vulcânicas do Grupo Iri fazem parte do conjunto tardi– a pós–colisional do evento magmático cálcio–alcalino Parauari, e consideram

a inclusão das rochas vulcânicas cálcio–alcalinas deste Grupo no mesmo evento magmático alcalino da Suíte Intrusiva Maloquinha inadequada. Já as vulcânicas e vulcanoclásticas alcalinas da Formação Moraes Almeida (Lamarão *et al.*, 2002) compõem, juntamente como os granitos da Suíte Maloquinha, o magmatismo anorogênico do tipo A do período de cratonização dos terrenos paleoproterozóicos.

5.3. Geologia Local

Na Mina do Palito afloram os granodioritos Parauari e Fofquinha e os granitos Palito, Rio Novo e Maloquinha, além de diques de pórfiros e de rochas básicas, por vezes hidrotermalizadas. Também são reconhecidas brechas hidrotermais e rochas cataclásticas. Nos arredores da mina afloram rochas granodioríticas da Suíte Intrusiva Parauari, assim como seus granitos tardios semelhantes ao granito Batalha (Juliani *et al.*, 2002), vulcânicas e vulcanoclásticas do Grupo Iri e granitos da Suíte Intrusiva Maloquinha.

Nas proximidades da mina também ocorrem coberturas de riolitos e de ignimbritos, além de diversos *stocks* de granito vermelho considerado como pertencente à Suíte Intrusiva Maloquinha. O Granodiorito Fofquinha é a rocha encaixante do Granito Rio Novo, e o Granito Palito constitui um pequeno corpo associado a uma estrutura circular, intrusivo no contato do Granodiorito Fofquinha com o Granito Rio Novo (Fig. 6).

Echeverri–Misas (2010) caracterizou a seqüência de eventos magmáticos associados à mineralização. Segundo esse autor, a seqüência teve início com a colocação de uma fase menos evoluída, representada pelo Granodiorito Fofquinha, intrusivo no Granodiorito Parauari, seguida pela colocação de diques irregulares de pórfiro riódacítico, formando diques com alguns metros de espessura máxima, além de alguns veios de brechas hidrotermais. Posteriormente, houve a intrusão do magma que gerou o Granito Rio Novo, encaixado predominantemente no Granodiorito Fofquinha, seguida pela colocação do Granito Palito. Diques de pórfiros cortam o Granito Palito, sendo alguns deles fortemente hidrotermalizados e outros não.

Rochas máficas e intermediárias comumente hidrotermalizadas, uma pequena intrusão circular em planta de um granito porfiritico com magnetita no Granodiorito Fofquinha, e corpos menores de granito de cor marrom, além de veios de aplito e freqüentes diques de brechas hidrotermais, finalizam o quadro evolutivo (Echeverri–Misas, 2010).

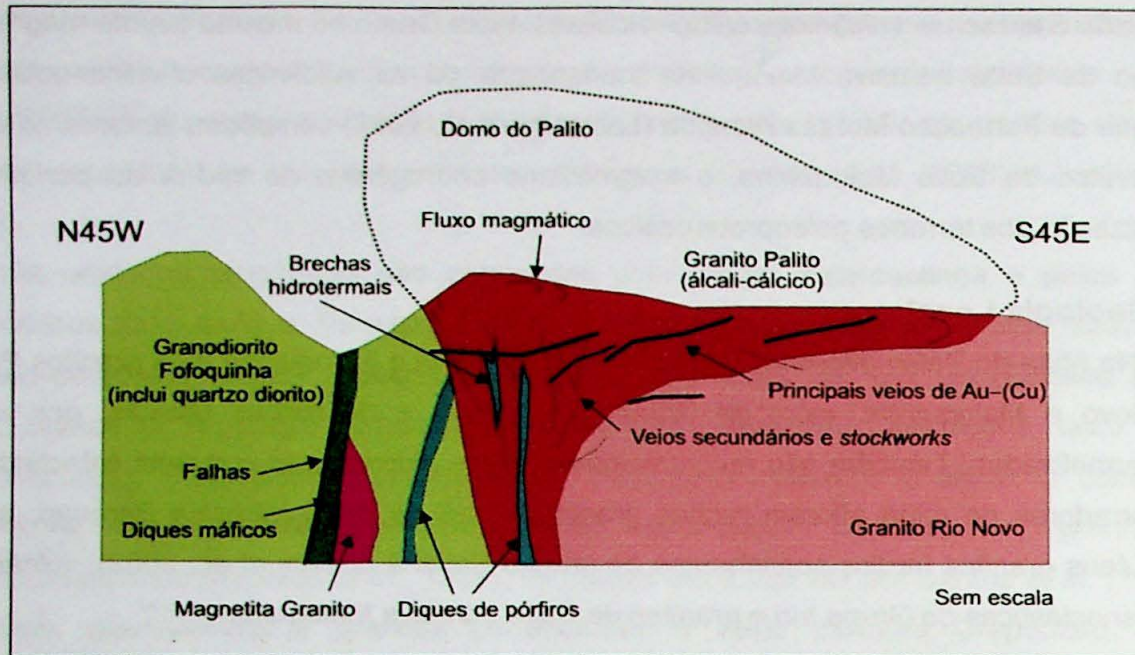


Figura 6. Perfil geológico esquemático orientado segundo NW-SE, mostrando as relações entre Granodiorito Fofquinha, os granitos Rio Novo e Palito, magnetita granito, diques de pórfiros e de diabásio e a distribuição dos veios mineralizados em Au-(Cu) (Juliani 2009).

5.3.1. Granito Palito

Echeverri-Misas (2010) descreve o Granito Palito como de granulação média, textura inequigranular, com variações locais para tipos levemente porfiríticos ou mais finos, especialmente nas proximidades do contato com o granito encaixante. A redução da granulação sugere um efeito de resfriamento nas bordas da intrusão. Seu índice de cor é muito baixo e é dado pela presença de biotita fina. Localmente apresenta restos de anfibólio parcialmente substituído por biotita.

Segundo Echeverri-Misas (2010), em uma zona de lavra na superfície no topo da colina onde aflora o Granito Palito, ocorrem estruturas de fluxo magmático indicativas de movimentação do magma do topo para a base da elevação, o que, juntamente com os mapas de superfície e com a morfologia dos contatos entre os granitos Palito e Rio Novo definidas em perfis de sondagens sugerem um corpo intrusivo dômico (Fig. 6). Echeverri-Misas (2010) também interpretou que tais estruturas podem ser indicativas da proximidade da cúpula da intrusão em níveis crustais relativamente rasos.

Echeverri-Misas (2010) descreveu que a alteração hidrotermal é caracterizada por um forte metassomatismo potássico pervasivo (Fig. 7), seguido por alterações propilíticas intensas em fraturas e zonas de *stockworks*, além de alteração sericítica fissural, com a qual se associam sulfetização e mineralização em ouro. Ainda, segundo Echeverri-Misas (2010), a intensidade da alteração hidrotermal diminui consideravelmente nas encaixantes (Granito Rio Novo e Granodiorito Fofquinha), nos quais os veios mineralizados são também mais delgados, e com menor teor de ouro e cobre. Também descreve alterações argílicas em fissuras, com pirofilita, sericita e caolinita nas proximidades da cúpula e nas porções distais

do Granito Palito.

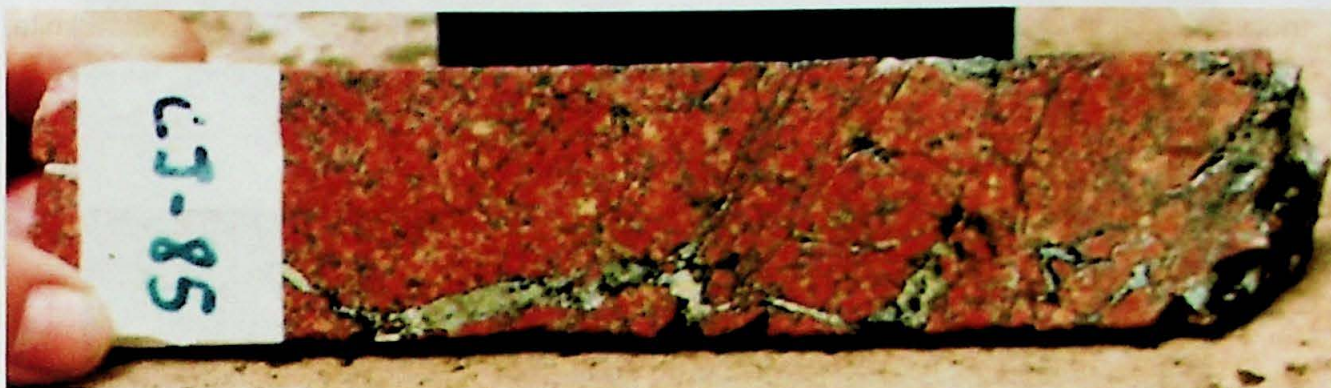


Figura 7. Aspecto típico do Granito Palito, com forte metassomatismo potássico, recortado por vênulas de quartzo.

Brechas hidrotermais e zonas fraturadas com pirita são freqüentes, com alteração hidrotermal propilítica mais fraca, a qual afeta rochas com forte metassomatismo potássico. Tipicamente as brechas possuem minerais carbonáticos, às vezes calcita placóide associada a clorita (Echeverri-Misas, 2010).

Todas as rochas hidrotermalizadas anteriormente descritas e o minério de Au-(Cu) foram afetados por falhas predominantemente rúpteis (Silva, 2004; Echeverri-Misas, 2010). Nestas falhas observa-se cloritização não muito intensa, silicificação fraca, além de minerais carbonáticos e fluorita abundantes. Comumente associam-se a essas falhas há uma segunda geração de veios de quartzo, de quartzo sulfetado ou de sulfetos maciços com fluorita e carbonatos, mas esses veios não estão mineralizados em ouro ou cobre e tipicamente têm apenas pirita como sulfeto, diferentemente dos veios pretéritos aos esforços rúpteis ou rúpteis-dúcteis, os quais têm calcopirita, bornita e calcosina. Segundo Echeverri-Misas (2010), essas falhas desmembraram os veios mineralizados e fragmentaram os minerais de minério e de ganga de todos os tipos de alteração hidrotermal, o que define claramente esse evento deformacional como posterior à mineralização de ouro e cobre.

5.3.2. Minério de Au-(Cu)

A mineralização de Au-(Cu) ocorre em veios de quartzo e sulfetos, nos quais a calcopirita é predominante, hospedados principalmente no Granito Palito, orientados segundo a direção NW-SE. Esses veios foram deformados em uma zona de falhas com a mesma orientação e veios de quartzo e de pirita não mineralizados associam-se a esse evento deformacional (Silva, 2004).

Os veios mineralizados (**Fotos 1 e 2**) têm espessuras variando de poucos milímetros até um ou dois metros e raramente ocorrem como bolsões mais espessos compostos por sericita, clorita, pirita e calcopirita (Echeverri-Misas, 2010). Observa-se também que os veios não são contínuos e freqüentemente são truncados por falhas (**Foto 3**).

Subordinadamente à calcopirita ocorrem calcocita, galena, pirrotita, esfalerita, ouro nativo e electrum. Minerais de bismuto estão tipicamente presentes no minério, incluindo bismuto nativo, bismutinita, makovickyita, wittichenita, hedleyita, pilsenita, tetradimita, argentocuproaurida, cuprobismutita, kupcikita, seleneto de bismuto e telúrio, telureto de prata e bismuto, matildita, dentre outros (Echeverri–Misas, 2010).

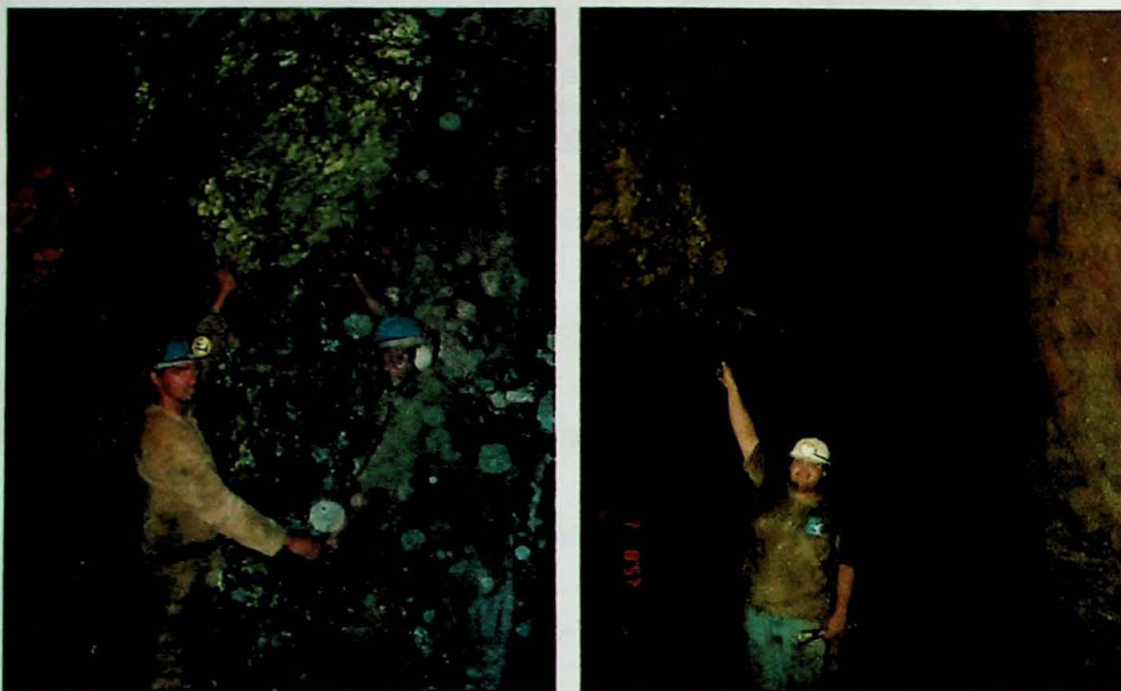


Foto 1. Aspecto dos veios de sulfetos com predominância de calcopirita e pirita, mineralizados em ouro e cobre, e encaixados no Granito Palito.

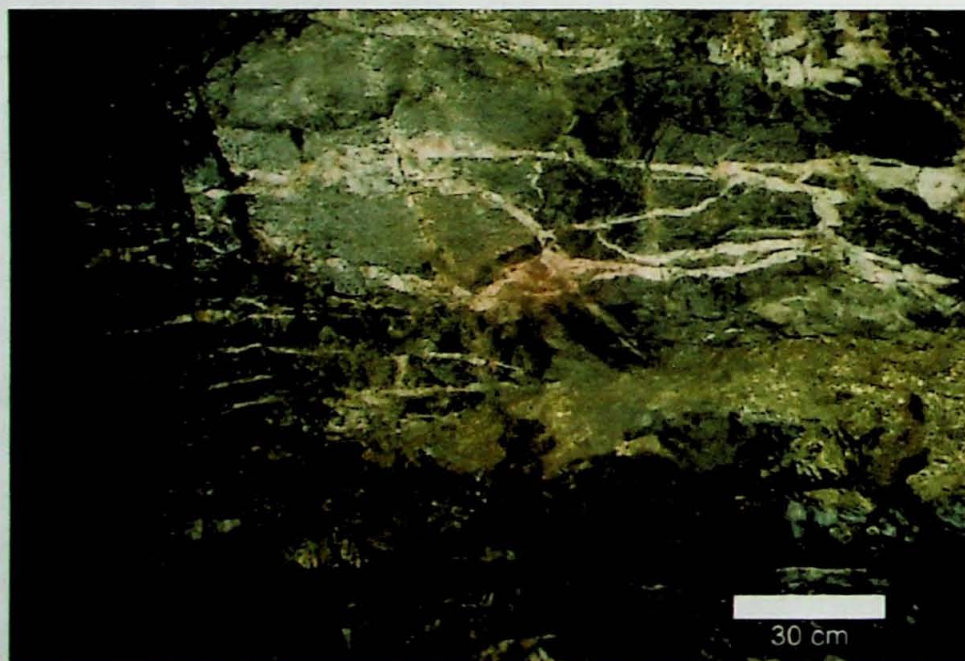


Foto 2. Zona de *stockwork* com veios e vênulas de quartzo e sulfetos mineralizados no contato do Granodiorito Fofquinha com o Granito Palito. Notar as zonas fortemente sulfetadas e as complexas relações de sobreposição dos veios.

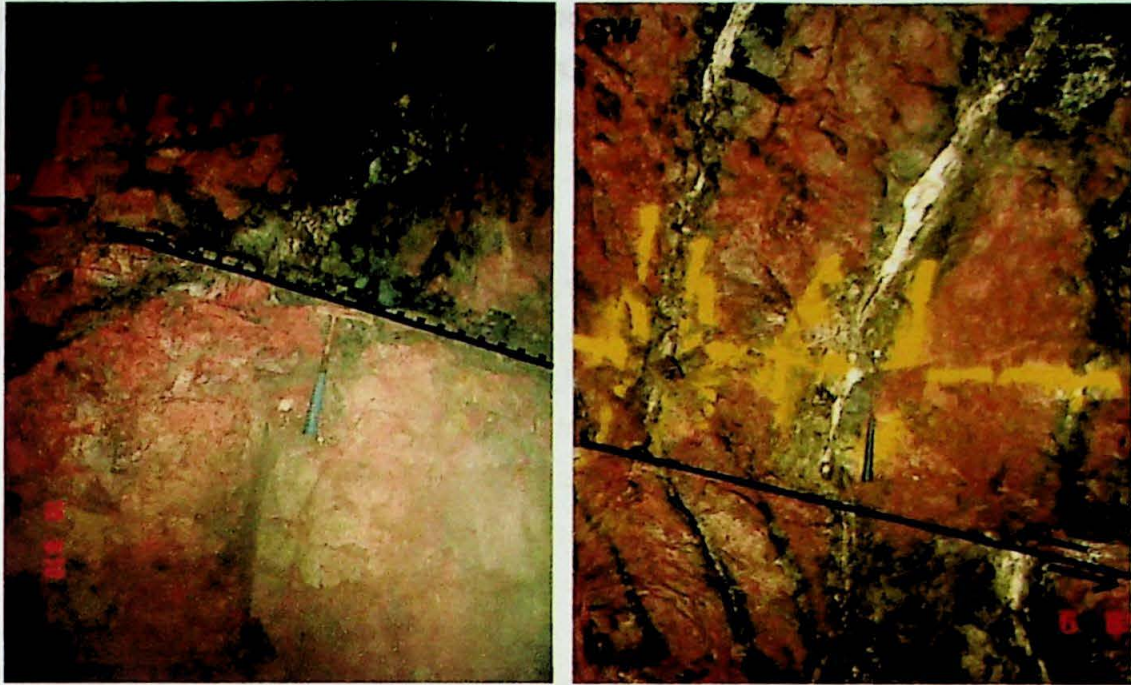


Foto 3. Aspectos das falhas que interrompem a continuidade do veio de minério, deslocando-os. As salbandas mais escuras são devidas à alteração propilítica e sericítica fissural que antecede a formação dos veios.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram estudadas inclusões fluidas primárias em lâminas bipolidas de amostras de quartzo de quatro veios mineralizados em Au-(Cu). Também foram caracterizados os minerais presentes nas cavidades das inclusões fluidas (fases sólidas) do quartzo de veios, e esperava-se determinar as fases gasosas presentes nestas inclusões.

Adicionalmente, foi realizada a petrografia de duas amostras do Granito Palito (CJ-36B e CJ-81), afetadas por metassomatismo potássico pervasivo, com característica cor vermelho intenso. Segundo Boone (1969), a cor vermelha típica da alteração potássica é resultada da presença de hematita no feldspato hidrotermal, formada durante o metassomatismo potássico. Após a petrografia, foram confeccionadas lâminas bipolidas destas duas amostras, de modo a serem analisadas as inclusões fluidas presentes em cristais de quartzo desenvolvidos como resultado da alteração potássica, a qual resulta principalmente em feldspato potássico + biotita + quartzo (Pirajno, 2009). Era esperado também obter medidas de inclusões presentes nos cristais de feldspato potássico, mas estes se apresentam muito turvos, devido à presença de hematita nestes cristais, impossibilitando que suas inclusões fluidas sejam analisadas.

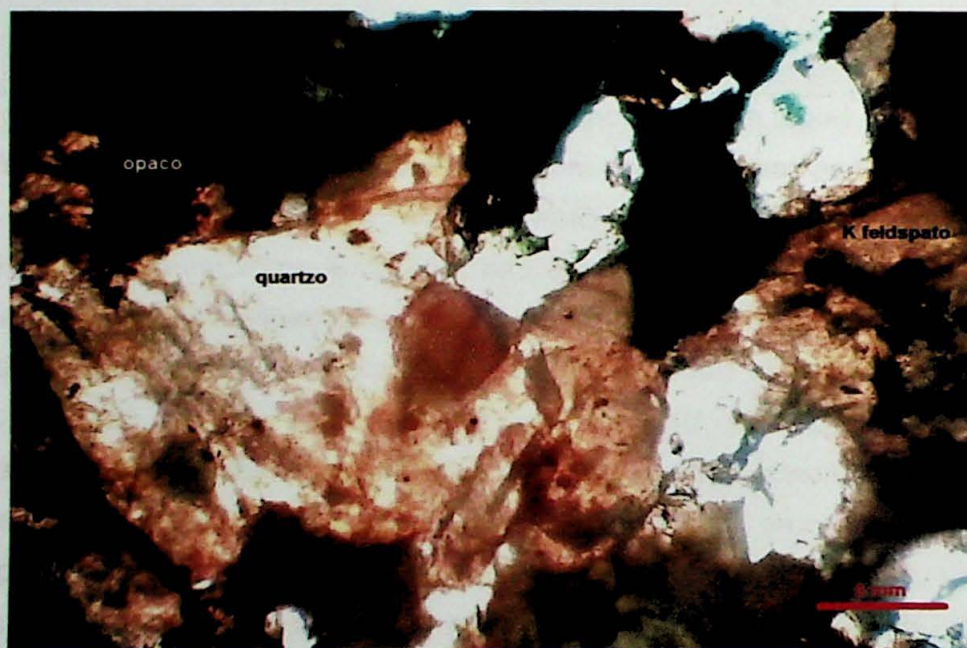
Por fim, desejava-se caracterizar as fases sólidas e as fases gasosas presentes em todas as amostras estudadas, por meio da espectroscopia Raman.

Parte dos dados de inclusões fluidas, aqui apresentados, será publicada na forma de capítulo no livro CONTRIBUIÇÕES À METALOGENIA DO BRASIL, a ser lançado pela

CPRM. O capítulo é intitulado: ESTUDO DAS INCLUSÕES FLUIDAS DA MINERALIZAÇÃO PALEOPROTEROZÓICA DE Au-(Cu) DO TIPO PÓRFIRO DO PALITO, PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS (PA). Este livro está na fase de impressão.

6.1. Petrografia da alteração potássica

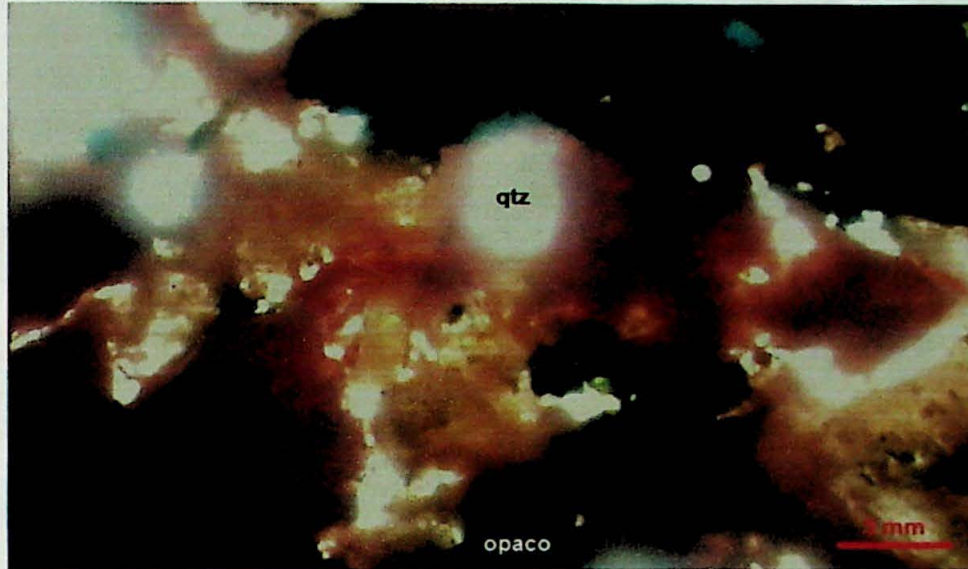
A amostra CJ-36B (**Fotomicrografia 1**) possui, em essência, feldspato potássico (60%) que se apresenta bastante turvo, cristais de quartzo (30%) bastante turvos com formas muito irregulares a mas regulares, e muitas inclusões fluidas primárias, mas também há inclusões em trilhas. As inclusões fluidas primárias, presentes nos cristais de quartzo, conferem a este um aspecto bastante turvo. Associado aos minerais opacos, e muitas vezes ao feldspato, ocorre cristais de clorita (5%), sendo estes últimos com formas bastante irregulares. Em geral, os cristais de quartzo mal formados, com íntima associação aos cristais de feldspato potássico, foram formados pela alteração hidrotermal potássica. Também ocorrem minerais opacos por toda a lâmina, estes cristais, em geral, ocorrem associados a clorita.



Fotomicrografia 1: Geral dos minerais da amostra CJ-36B. Notar os cristais turvos de feldspato potássico, e a íntima relação entre o quartzo mal formado e o feldspato potássico no canto esquerdo da fotomicrografia.

A amostra CJ-81 (**Fotomicrografia 2**) foi afetada por um metassomatismo potássico mais intenso que a amostra CJ-36B. Possui cristais de feldspato potássico (68%) muito turvos e com cor vermelho intenso, estes cristais estão ligados entre si, formando um aspecto de malha por toda a lâmina, não é possível reconhecer geminações. Os cristais de quartzo (25%) variam desde bastante irregulares a mais regulares, também são bastante

turvos, com muitas inclusões fluidas primárias. Também ocorre clorita, em menor quantidade (2%), associada aos cristais opacos, com formas bastantes irregulares, e cristais bastante pequenos. Ocorrem minerais opacos por toda a lâmina (5%).



Fotomicrografia 2. Geral dos minerais da amostra CJ-81. Notar os cristais turvos e bastante vermelhos de feldspato potássico.

6.2. Microtermometria

As análises microtermométricas foram realizadas no Laboratório de Inclusões Fluidas do Departamento de Mineralogia e Geotectônica do Instituto de Geociências da USP. Utilizou-se do método microtermométrico descrito por Roedder (1984) e Shepherd *et al.* (1985). Para tanto, foi utilizada a platina de resfriamento e aquecimento LINKAM MDS 600 (**Foto 4**), com *software* de controle de temperatura e coleta de dados LINKSYS 32, acoplada a um microscópio petrográfico Olympus BX-51 com câmera digital Olympus E330 e monitor LCD da SONY. A calibração da platina LINKAM MDS 600 segue os padrões SYN FLINC (*Synthetic Fluid Inclusions*) para as seguintes temperaturas:

- $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Padrão 1: composição 75 mol% de H_2O e 25 mol% de CO_2 .
- $-21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Padrão 2: composição eutética do sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$, com 23,2% em peso de NaCl equivalente.
- $-10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Padrão 3: composição eutética do sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{KCl}$, com 19,6% em peso de KCl.
- $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $374,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Padrão 4: água pura (ponto triplo e ponto crítico, respectivamente)
- $573,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Padrão 5: transição do quartzo α para o quartzo β .

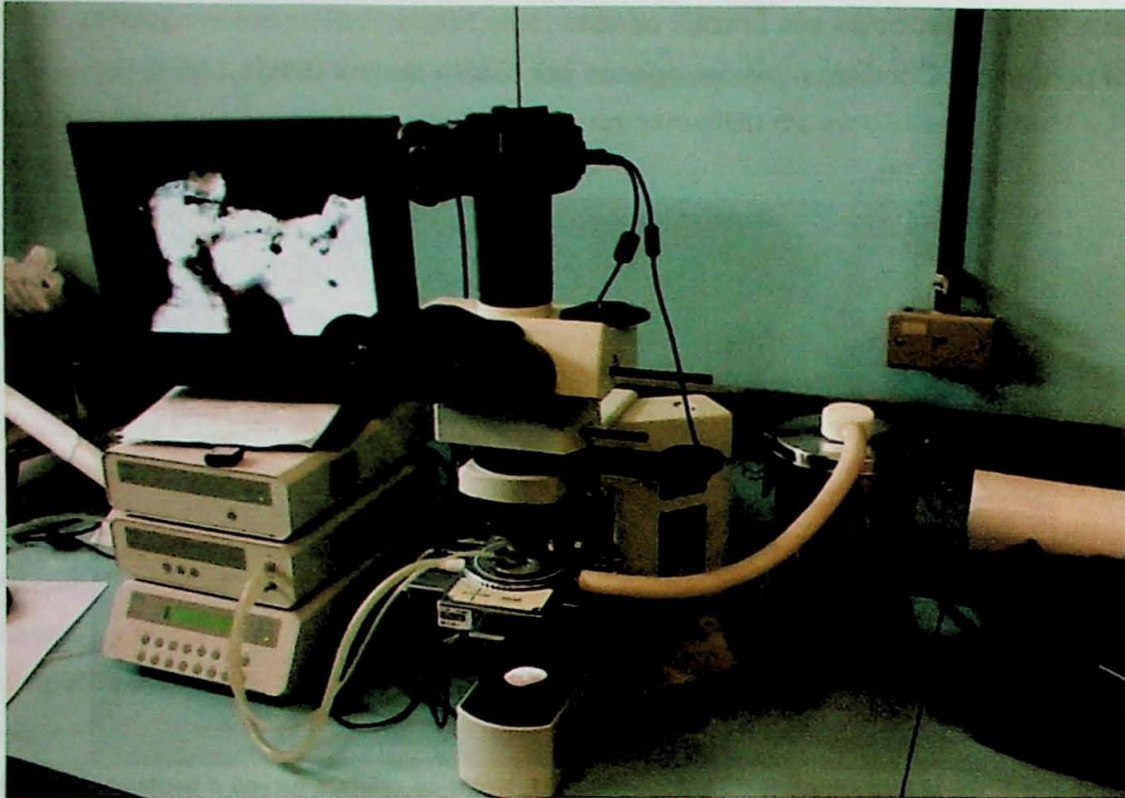


Foto 4. Platina de resfriamento e aquecimento LINKAM MDS 600 acoplada a um microscópio petrográfico Olympus BX-51 com câmera digital Olympus E330 e monitor LCD da SONY.

Para as amostras de quartzo de veios mineralizados, foram obtidas as temperaturas relativas às mudanças de fase das soluções, tais quais temperaturas do ponto eutético (TE), fusão do gelo (TF_G) e homogeneização total (TH_{TOTAL}), além de serem coletadas informações sobre a relação entre a fase vapor e a fase total das inclusões (V_{VAPOR}/V_{TOTAL}). Com o uso do *software FLUIDS* (Bakker, 2003), foi possível determinar as salinidades (% em peso equivalente de NaCl) e densidades (d) dos fluidos. A interpretação dos diagramas construídos a partir dos dados obtidos nas etapas de resfriamento e aquecimento possibilitou o melhor entendimento das temperaturas e processos envolvidos durante a cristalização do quartzo hospedeiro, além de sugerir o tipo de processo geológico responsável pela gênese da mineralização.

Para as amostras de granito afetado pelo metassomatismo potássico, foram obtidas as temperaturas do ponto eutético (TE), fusão do gelo (TF_G) das soluções aquosas, temperatura de homogeneização líquido-vapor (TH_{L-V}), temperatura de dissolução dos sólidos de saturação ($TD_{SÓLIDO}$) e a temperatura de homogeneização total das fases (TH_{TOTAL}). Posteriormente, foram calculados com o *software FLUIDS* (Bakker, 2003) as salinidades e densidades dos fluidos. Do mesmo modo que foi feito para os dados dos veios mineralizados, foram construídos diagramas para as IFs das amostras do granito, e a partir dos quais foram feitas as interpretações acerca dos processos envolvidos durante a alteração hidrotermal potássica.

6.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises de MEV foram utilizadas para a determinação das fases sólidas presentes nas cavidades das inclusões fluidas das amostras de quartzo sulfetado dos veios mineralizados. As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), com o equipamento LEO 430i (Cambridge/Leica) com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) CatB (*Oxford microanalysis group*) acoplado.

As lâminas bipolidas de quartzo foram quebradas na direção perpendicular à laminação (**Fig. 7**) para que os minerais presentes nas cavidades ficassem expostos, em seguida as amostras foram submetidas à metalização. A metalização consiste na precipitação à vácuo de uma película micrométrica de um material condutor, neste caso foi utilizado o ouro, sobre a superfície da amostra, possibilitando a condução da corrente elétrica, necessária para a análise.

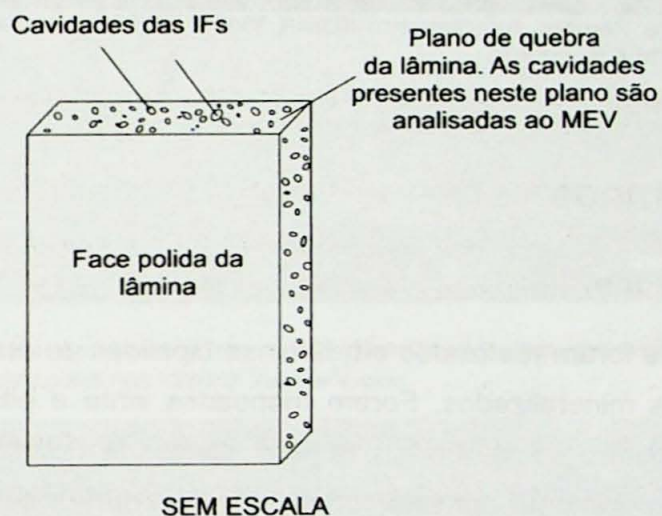


Figura 7. Esquema de lâmina bipolida de quartzo, quebrada e com as cavidades das inclusões fluidas expostas, para análise ao MEV.

6.4. Espectroscopia Raman

As análises por microespectroscopia Raman foram realizadas no Instituto de Geociências da UNICAMP por meio de um equipamento JOBIN YVON T64000 (**Foto 5**), acoplado a um detector CCD, com sistema de resfriamento a N_2 líquido. O feixe do laser de argônio, excitado com uma linha de 514,5 nm, é irradiado nas inclusões a uma potência de saída na fonte de 500–600 mW.

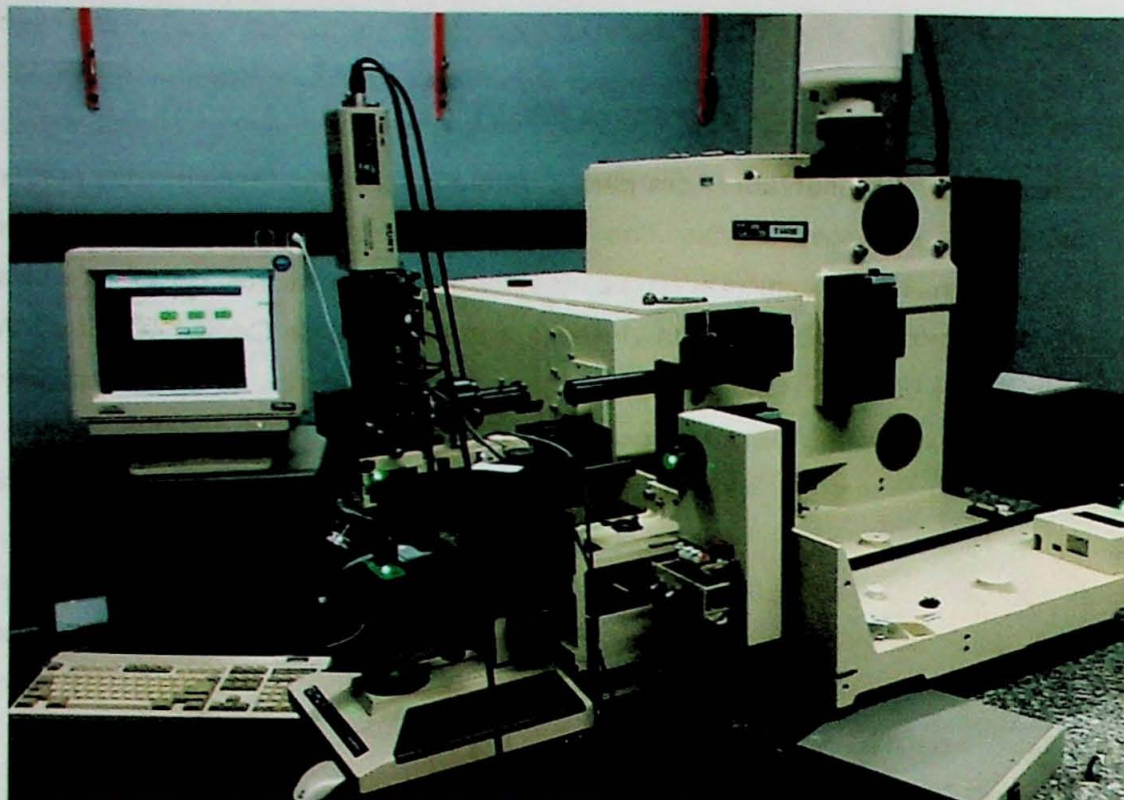


Foto 5. Microespectrômetro Raman: equipamento JOBIN YVON T64000, acoplado a um detector CCD, com sistema de resfriamento a N₂ líquido

7. RESULTADOS OBTIDOS

7.1. Veios Mineralizados

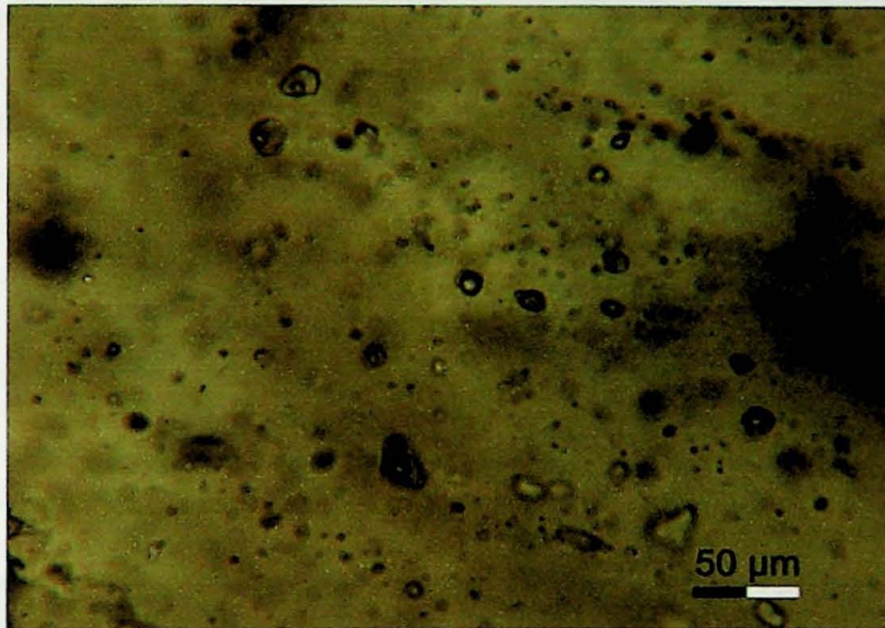
Os estudos de IFs foram realizados em lâminas bipolidas de amostras de quartzo de quatro veios sulfetados mineralizados. Foram mapeados vinte e oito campos potenciais, distribuídos entre os quatro veios. Foram obtidos dados de resfriamento em dezesseis campos e dados de aquecimento em seis campos. O total de IFs que foram submetidas a aquecimento e/ou resfriamento é de aproximadamente 250 inclusões.

Os dados obtidos pela microtermometria e os parâmetros calculados para as IFs dos quatro veios mineralizados são apresentados na **Tabela 1**.

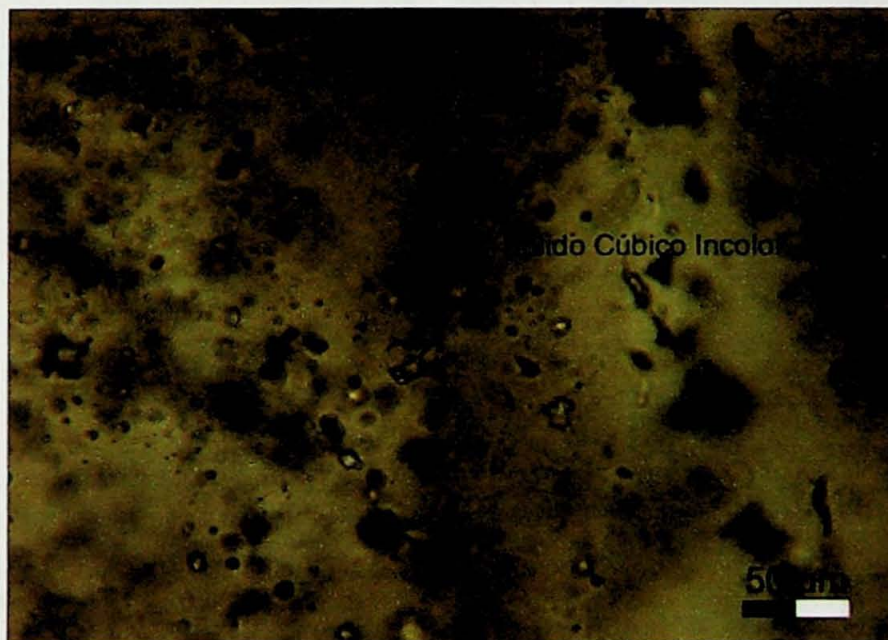
Tabela1. Dados microtermométricos e parâmetros calculados para inclusões fluidas em quartzo dos veios mineralizados da Mina Palito.

Amostra	T _{FG} (°C)	T _H TOTAL (°C)	Salinidade		TE (°C)	d (g/cm ³)
			(eq. % peso NaCl)	V _{VAPOR} /V _{TOTAL}		
Quartzo	-23,3 a - 0,3	101 a 462	0,3 a >23,8	0,05 a 0,85	-74 a -40	0,15 a 1,11

As IFs primárias das amostras de quartzo de veios mineralizados são, em essência, aquosas, mas com algumas inclusões de regiões distintas um pouco mais ricas em CO₂, e apenas uma inclusão descrita como trifásica (H₂O líquida + CO₂ líquido + CO₂ gasoso). As inclusões aquosas apresentam grandes variações na relação V_{VAPOR}/V_{TOTAL} (**Fotomicrografia 3**) com valor mínimo de 5% e máximo de 90% da fase vapor. Ao microscópio também foram observados sólidos nas inclusões, geralmente cúbicos e incolores (**Fotomicrografia 4**); outros são incolores sem forma bem definida. Adicionalmente foram observados minerais opacos, inclusos.



Fotomicrografia 3. Amostra de quartzo de veio mineralizado com exemplos de inclusões fluidas, primárias, com grandes variações nas razões V_{VAPOR}/V_{TOTAL} .

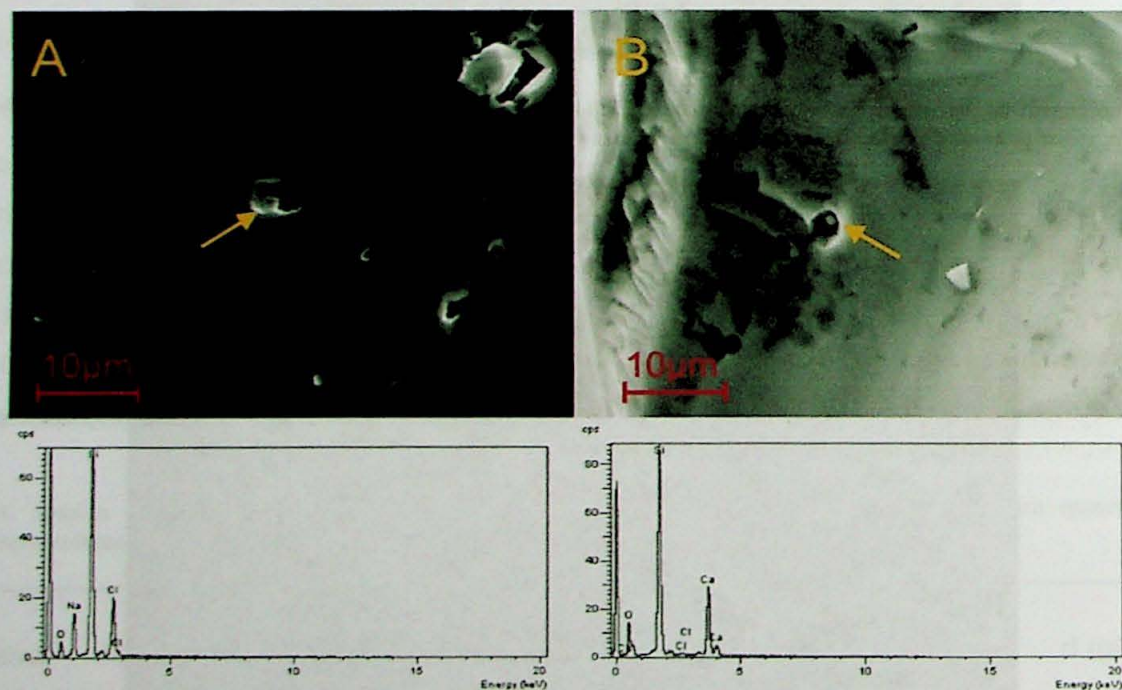


Fotomicrografia 4. Amostra de quartzo de veio mineralizado com sólido de saturação incluído.

A morfologia das inclusões varia desde bastante irregulares a inclusões bastante regulares (**Fotomicrografia 5**). Foram caracterizados alguns sólidos presentes nas inclusões pelo uso do MEV; foram identificados minerais de saturação (*daughter minerals*) como halita (**Fotomicrografia 6A**) e cloreto de cálcio hidratado (**Fotomicrografia 6B**). Outros sólidos opacos presentes nas inclusões, provavelmente sulfetos, não foram detectados ao MEV e ao micro-Raman.



Fotomicrografia 5. Amostra de quartzo de veio mineralizado com exemplos de inclusões com formas bastante regulares e irregulares.



Fotomicrografia 6. Fotomicrografias ao MEV. (A) cristal de halita em cavidade de inclusão, com espectros abaixo. (B) cristal de cloreto de cálcio em cavidade de inclusão com espectros abaixo.

As temperaturas do ponto eutético (TE) concentram-se entre -58 e -42 °C (**Fig. 8**), refletindo um sistema complexo de fluidos com a presença de Ca^{2+} , Na^+ e, provavelmente,

K^+ na solução aquosa, segundo dados experimentais obtidos por Yanatieva (1946) e Davis *et al.* (1990), dentre outros. Segundo Davis *et al.* (1990), o sistema $H_2O + NaCl + CaCl_2$ apresenta eutético estável em $-52\text{ }^\circ\text{C}$. Os valores inferiores a $-52\text{ }^\circ\text{C}$, apresentados na **Tabela 1**, podem ser devidos à presença de K^+ ($TE = -55\text{ }^\circ\text{C}$, Yanatieva, 1946). As temperaturas bem mais baixas observadas em algumas inclusões, podem ser resultar da existência de outros íons, ou ainda, à metaestabilidade do sistema $H_2O + CaCl_2 + NaCl$, cujos eutéticos podem chegar até $-70\text{ }^\circ\text{C}$, segundo Davis *et al.* (1990).

As temperaturas de fusão do gelo (TF_G) concentram-se entre -6 e $-0,3\text{ }^\circ\text{C}$ (**Fig. 9**), refletindo salinidades situadas principalmente entre 0,3 e 8,0% em peso equivalente de NaCl (**Fig. 10**). Entretanto, há quantidades bastante significativas de inclusões com salinidades superiores, entre 8,0 e 23,8% em peso equivalente de NaCl (**Fig. 10**).

Algumas das inclusões com maiores relações V_{VAPOR}/V_{TOTAL} apresentaram TH_{TOTAL} elevadas com homogeneização para a fase vapor, acima de $400\text{ }^\circ\text{C}$ (**Fig. 11**). Outras homogeneizaram para a fase vapor em temperaturas inferiores, apresentando, muitas vezes, uma faixa de valores semelhantes às de menores V_{VAPOR}/V_{TOTAL} , embora nesses casos as TH_{TOTAL} não tenham sido obtidas com precisão, e por conseqüência, seus dados não foram adicionados ao trabalho.

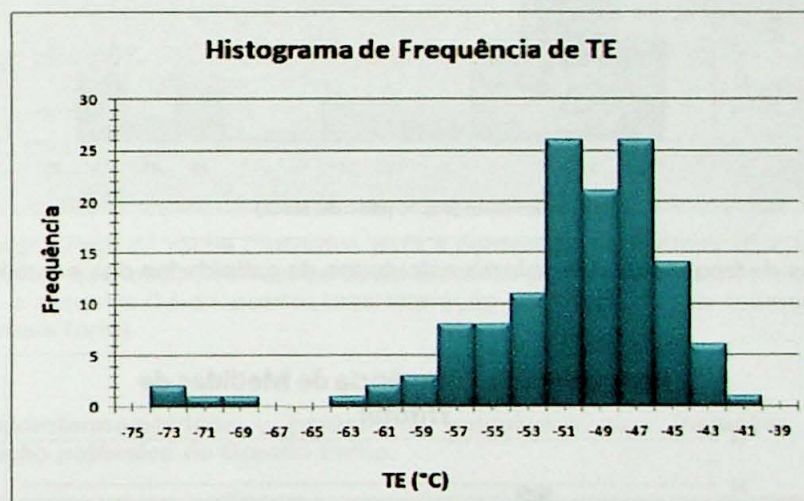


Figura 8. Histograma de frequência de medidas das temperaturas eutéticas (TE) das soluções aquosas presentes em inclusões fluidas em quartzo de veios mineralizados da Mina do Palito.

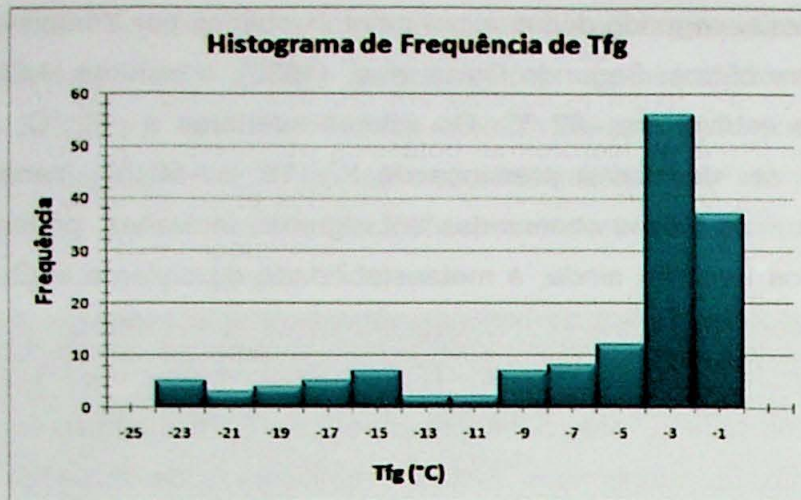


Figura 9. Histograma de frequência de medidas das temperaturas de fusão do gelo (TF_G) em inclusões fluidas em quartzo de veios mineralizados da Mina do Palito.

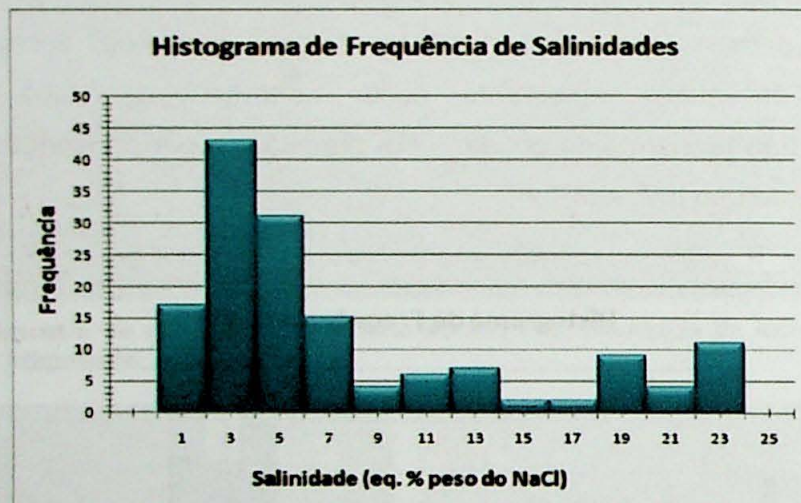


Figura 10. Histograma de frequência dos valores calculados de salinidades das soluções aquosas.

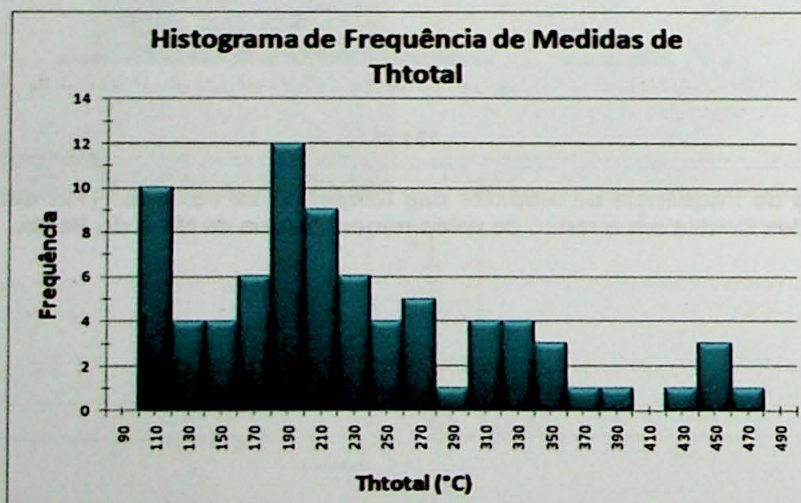


Figura 11. Histograma de frequência de medidas das temperaturas de homogeneização total do fluido aprisionado em quartzo de veios mineralizados da Mina Palito.

7.2. Alteração Potássica

Os estudos de IFs foram realizados em lâminas bipolidas de amostras do Granito Palito afetados por alteração hidrotermal potássica pervasiva (CJ-36B e CJ-81) (Foto 6). Foram mapeados seis campos potenciais, distribuídos entre as duas amostras, e obtidos dados de resfriamento em cinco campos, e dados de aquecimento em dois campos. O total de IFs submetidas à microtermometria é de 98 IFs.

Os dados obtidos pela microtermometria e os parâmetros calculados para as IFs são apresentados na Tabela 2.

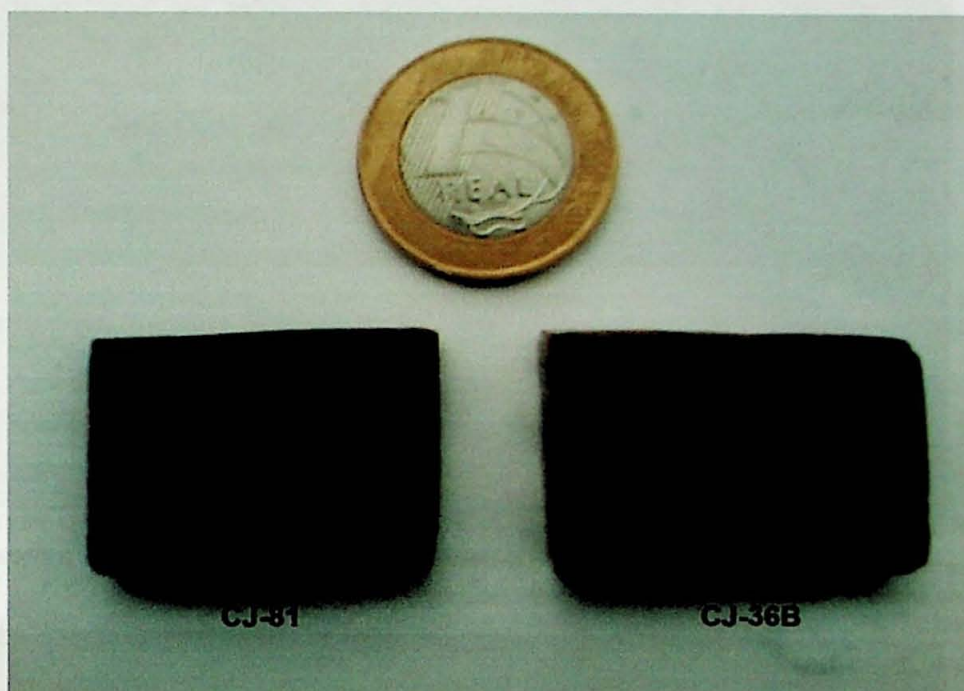


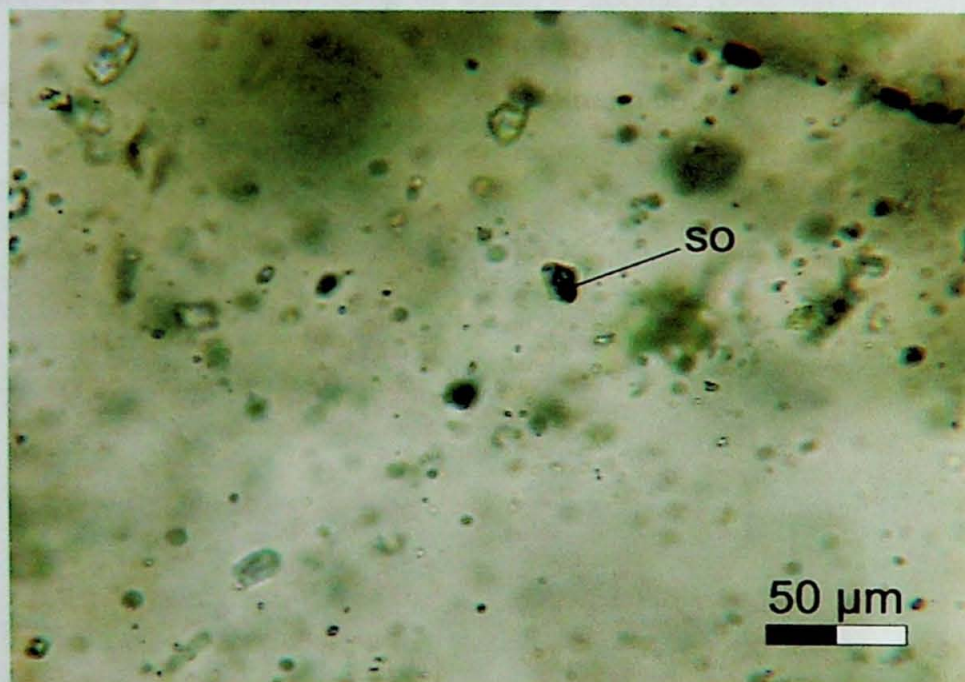
Foto 6. Foto dos fragmentos de rocha utilizados para a confecção de lâminas bipolidas para a análise de inclusões fluidas. Notar que ambas as rochas estão afetadas por metassomatismo potássico, resultando na cor vermelha, e a amostra CJ-81 possui uma alteração hidrotermal mais intensa que a amostra CJ-36B (cor vermelha mais forte).

Tabela 2. Dados microtermométricos e parâmetros calculados para inclusões fluidas em quartzo associados à alteração potássica do Granito Palito.

Amostra	T_{FG} (°C)	TH_{TOTAL} (°C)	Salinidade		TE (°C)	d (g/cm ³)
			(eq. % peso NaCl)	V_{VAPOR}/V_{TOTAL}		
CJ-36B	-28,7 a -13	194,8 a 511,3	17,2 a 66,4	0,05 a 0,26	-62,5 a -50	0,8 a 1,4
CJ-81	-37 a -17	206,8 a 570	20,7 a 67,5	0,05 a -0,92	-73,1 a -55,7	0,8 a 1,2

As inclusões fluidas primárias nos cristais de quartzo associados à alteração potássica pervasiva são predominantemente aquosas, trifásicas (H₂O líquida + vapor d'água + sólido) sem grandes variações na relação V_{VAPOR}/V_{TOTAL} . É comum observar sólidos incolores e cúbicos e não cúbicos nas inclusões, alguns prismáticos, outros sem forma bem definida,

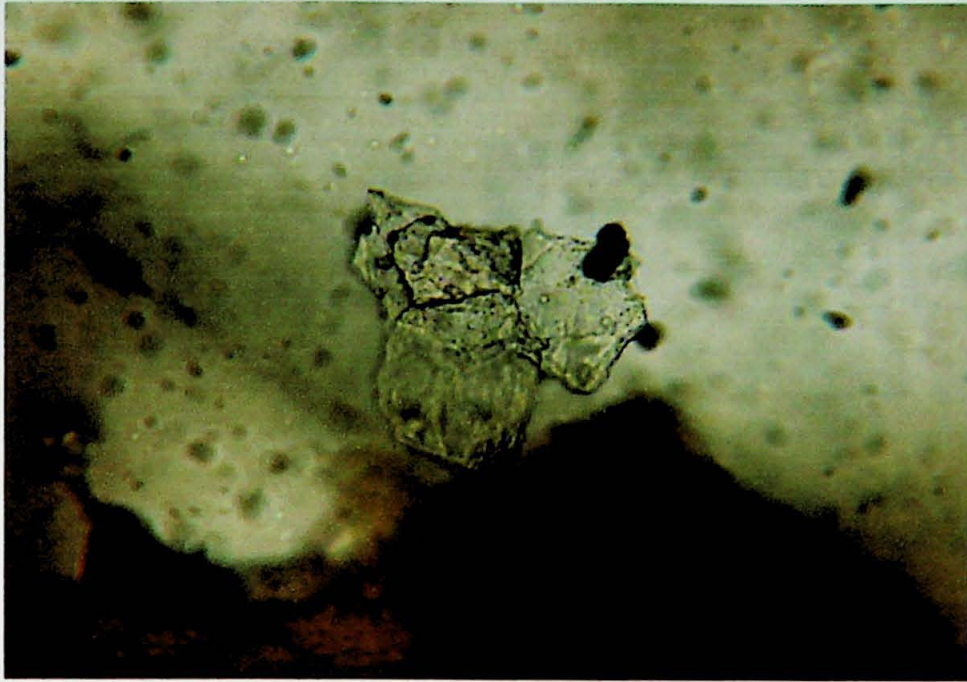
além de sólidos opacos (**Fotomicrografia 7**), sendo estes últimos menos freqüentes. Em muitos casos, ocorre mais de um sólido na mesma inclusão (**Fotomicrografia 8**). Também ocorrem muitos sólidos com feições de *melt inclusions* (**Fotomicrografia 9**), indicando aprisionamento a temperaturas muito elevadas.



Fotomicrografia 7. Amostra de quartzo formado durante a alteração potássica. Notar a presença de sólido opaco (SO) na inclusão fluida. Amostra CJ-36B.



Fotomicrografia 8. Amostra de quartzo formado durante a alteração potássica. Notar a grande quantidade de sólidos inclusos. SIP: sólido incolor prismático; SIC: sólido incolor cúbico; SI: sólido incolor. Amostra CJ-81.



Fotomicrografia 9. Provável *melt inclusion* no centro da fotomicrografia. A mancha marrom é o feldspato potássico, bastante turvo, formado pelo metassomatismo potássico ao qual a rocha foi submetida.

As temperaturas do ponto eutético (TE) concentram-se entre -65 e -55 °C (Fig. 12), refletindo um sistema complexo de fluidos com a presença de Ca^{2+} , Na^+ e K^+ na solução aquosa, segundo dados experimentais obtidos por Yanatieva (1946) e Davis *et al.* (1990), dentre outros. Segundo Davis *et al.* (1990), o sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl} + \text{CaCl}_2$ apresenta eutético estável em -52 °C. Os valores inferiores a -52 °C, apresentados na Tabela 2 e na figura 12, são devidos à presença de K^+ (TE = -55 °C, Yanatieva, 1946), fato que é bastante esperado, uma vez que estas soluções foram responsáveis pelo desenvolvimento do metassomatismo potássico no Granito Palito. As temperaturas bem mais baixas observadas, próximas a -70 °C (Tabela 2 e Fig. 12), podem ser resultar da existência de outros íons, ou ainda, à metaestabilidade do sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{CaCl}_2 + \text{NaCl} + \text{KCl}$, cujos eutéticos podem chegar até -70 °C, segundo Davis *et al.* (1990).

As salinidades das soluções concentram-se entre 25 e 30% em peso equivalente de NaCl (Fig. 13). Entretanto, há quantidades bastante significativas de inclusões com salinidades superiores, atingindo salinidades maiores que 40% em peso equivalente de NaCl, com máximo de 67,5% em peso equivalente de NaCl e mínimo de 17,2% em peso equivalente de NaCl (Tabela 2), tratando-se deste modo de um sistema de soluções aquosas hipersalinas.

Algumas das inclusões com maiores relações $V_{\text{VAPOR}}/V_{\text{TOTAL}}$ apresentaram TH_{TOTAL} elevadas com homogeneização para a fase vapor, acima de 500 °C (Fig. 14), com máximo de 570 °C (Tabela 2).

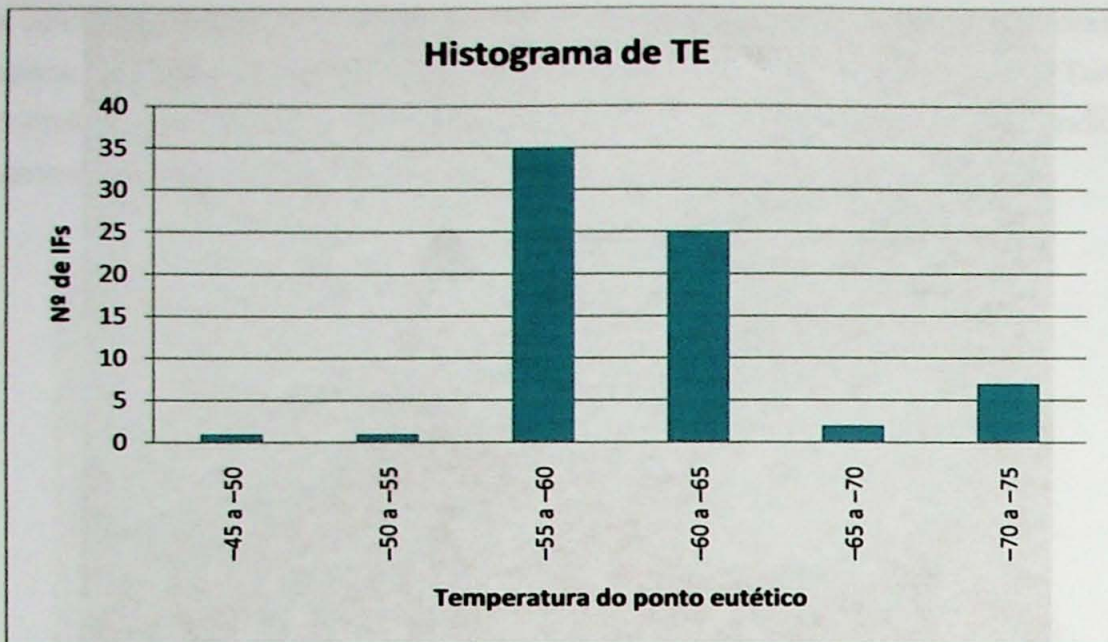


Figura 12. Histograma de frequência de medidas das temperaturas eutéticas (TE) das soluções aquosas em inclusões fluidas em quartzo formado na alteração hidrotermal potássica do Granito Palito.

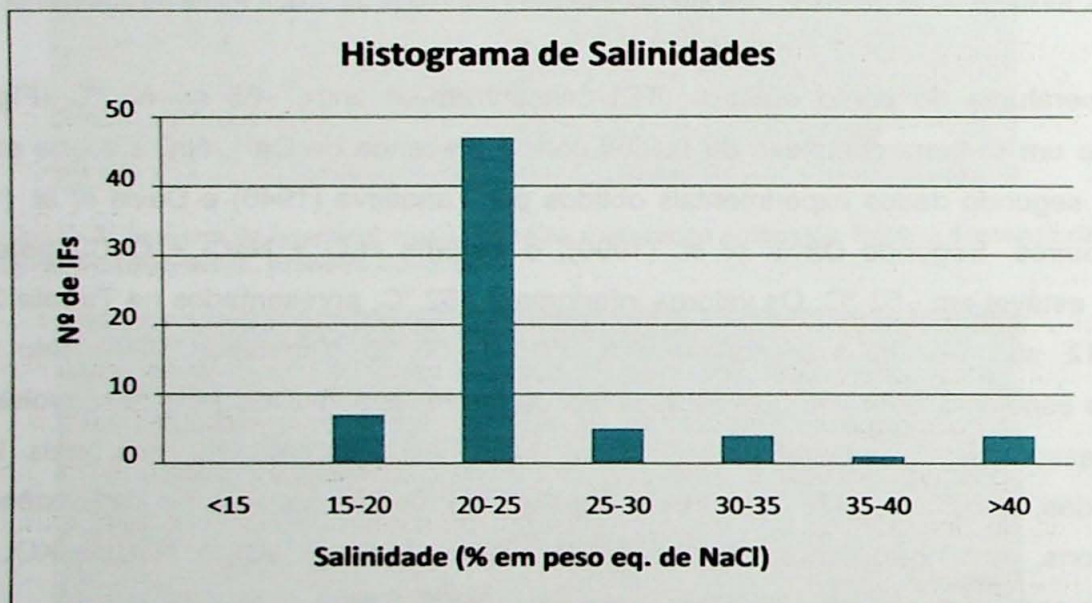


Figura 13. Histograma de frequência dos valores calculados de salinidades das soluções aquosas.

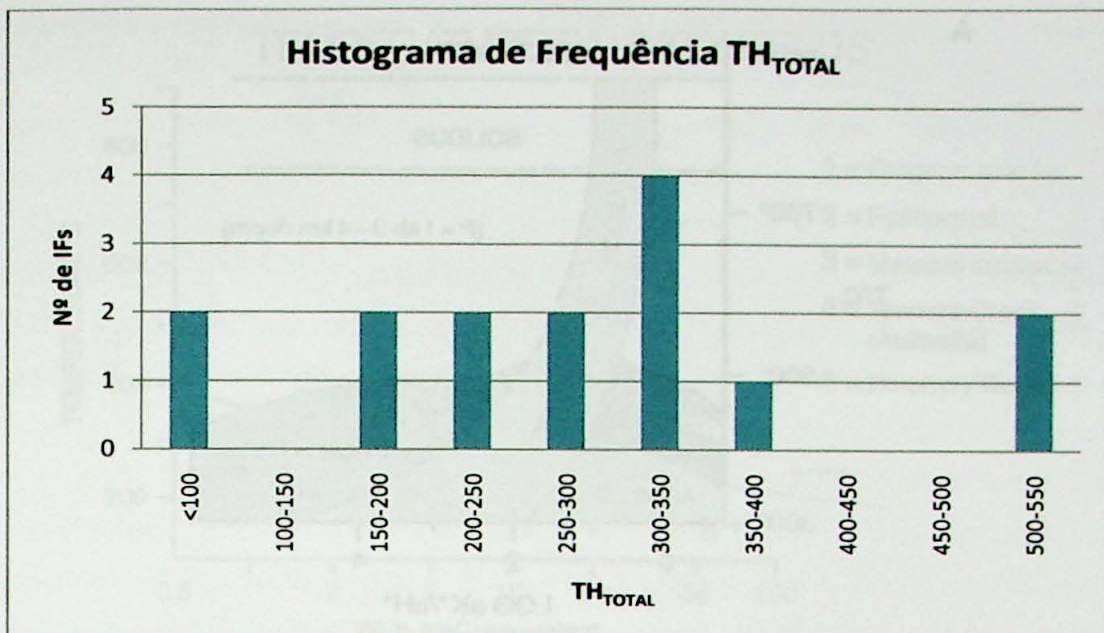


Figura 14. Histograma de frequência de medidas das temperaturas de homogeneização total do fluido aprisionado em quartzo formado na alteração hidrotermal potássica do Granito Palito.

8. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

Segundo Pirajno (2009), o metassomatismo potássico ocorre a temperaturas bastante elevadas (Fig. 16), sendo causado por fluidos primitivos dos sistemas magmático–hidrotermais do tipo pórfiro. Ainda, segundo Pirajno (2009), com o decréscimo progressivo da temperatura dos fluidos do sistema magmático–hidrotermal, a alteração potássica dá lugar à alteração sericítica (Fig. 17). No diagrama da Figura 18, o autor apresenta campos de formação para diferentes tipos de depósitos minerais, com suas características relacionadas à salinidade e temperatura de aprisionamento das inclusões fluidas. Neste diagrama, é possível visualizar que os fluidos formadores dos sistemas magmático–hidrotermais do tipo pórfiro, são os que possuem maiores salinidades e temperaturas de aprisionamento.

De acordo com Echeverri–Misas (2010), a mineralização de Au–(Cu) do Palito é sincrônica à alteração sericítica, deste modo, os fluidos mineralizantes estudados nas amostras de quartzo dos veios com Au–(Cu), também foram responsáveis pelo desenvolvimento da alteração sericítica, e representam fluidos hidrotermais mais evoluídos (Fig. 16) em relação aos fluidos causadores da alteração hidrotermal potássica.

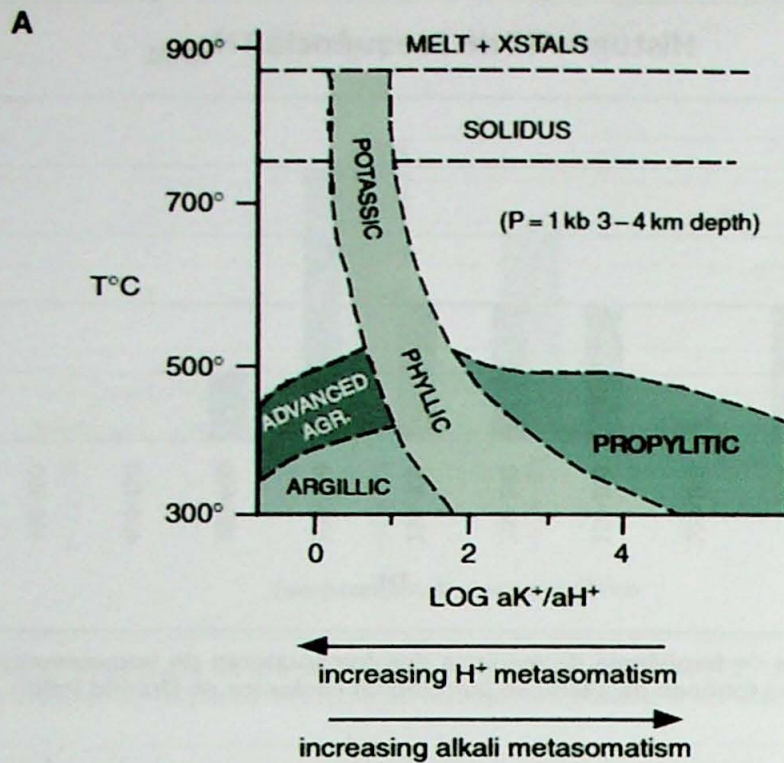


Figura 15. Ilustração com os tipos de alteração hidrotermal em função da temperatura e atividade de K^+ e H^+ (Pirajno, 2009)

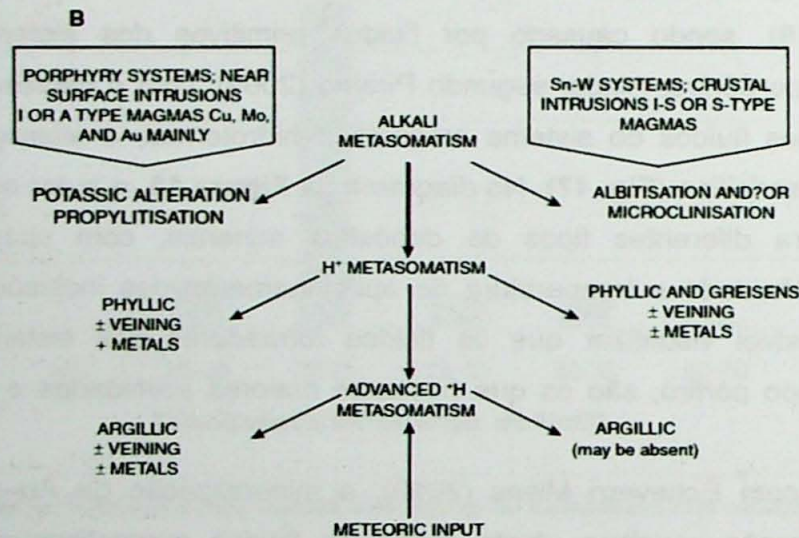


Figura 16. O metassomatismo alcalino libera H^+ , resultando na diminuição da relação álcali/ H^+ , e conseqüentemente a desestabilização dos feldspatos e micas e desenvolvimento de nova assembléia mineral (Pirajno, 2009)

TEMPERATURE-SALINITY FIELDS

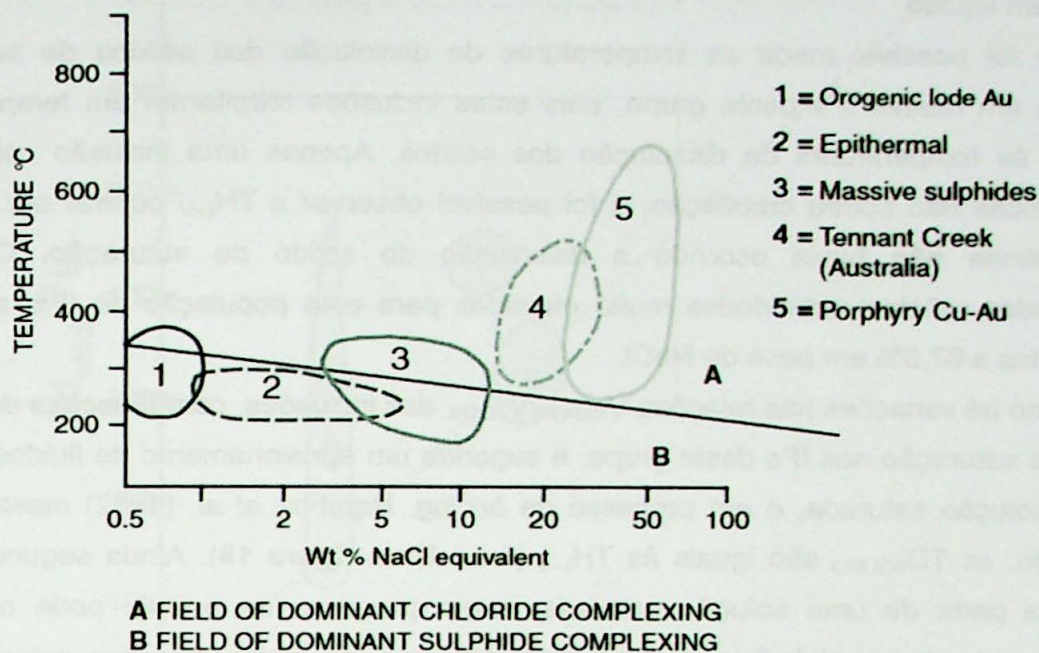


Figura 17. Campos de temperatura e salinidade para sistemas hidrotermais: (1) Mineralização orgênica de Au, arqueana; (2) Epitermal de Au-Ag; (3) VMS (4) Tennant Creek Au-Cu, Austrália; (5) Pórfiro de Cu-Au, segundo Pirajno (2009).

8.1. Alteração Potássica

8.1.1. Amostra CJ-81

As inclusões fluidas presentes na amostra CJ-81, afetada por intensa alteração potássica pervasiva e com cor vermelha intensa (**Foto 6**), são em essência aquosas, com presença de muitos sólidos, incluindo sólidos de saturação (*daughter minerals*) com hábitos cúbicos (halita e silvita), sólidos de saturação não cúbicos, possivelmente CaCl_2 hidratado, além de sólidos ocasionais, sendo estes últimos, em geral, opacos. Por meio das análises de microespectroscopia Raman, esperava-se conhecer a composição destes minerais opacos, os quais são provavelmente sulfetos, mas conforme foi apresentado no item "Dificuldades Encontradas", não foi possível o reconhecimento dos minerais e das fases gasosas das inclusões, por meio da microespectroscopia Raman.

Durante o mapeamento das inclusões, e principalmente durante a realização das etapas de microtermometria, foram reconhecidos dois grupos distintos de inclusões.

a) Grupo 1

O primeiro grupo é caracterizado por IFs ricas em vapor, associadas a IFs mais ricas em líquido, com sólidos cúbicos de saturação (halita e silvita), e morfologias regulares. As inclusões deste grupo apresentam altos valores de temperatura de homogeneização

líquido-vapor (TH_{L-V}), variando de 400 a 570 °C, e coexistência de IFs ricas em vapor com IFs ricas em líquido.

Não foi possível medir as temperaturas de dissolução dos sólidos de saturação ($TD_{SÓLIDO}$) em muitas IFs deste grupo, pois estas inclusões crepitaram em temperaturas inferiores às temperaturas de dissolução dos sólidos. Apenas uma inclusão com estas características não sofreu crepitação, e foi possível observar a TH_{L-V} ocorrer em 555 °C, quando ainda não havia ocorrido a dissolução do sólido de saturação. Os fatos apresentados refletem salinidades muito elevadas para esta população de IFs, atingindo equivalentes a 67,5% em peso de NaCl.

Como há variações nas relações V_{VAPOR}/V_{TOTAL} das inclusões, com presença de muitos cristais de saturação nas IFs deste grupo, é sugerido um aprisionamento de fluidos a partir de uma solução saturada, e em processo de *boiling*. Ramboz *et al.* (1982) mostram que neste caso, as $TD_{SÓLIDO}$ são iguais às TH_{L-V} (**área B da figura 19**). Ainda segundo estes autores, a partir de uma solução saturada, e em processo de *boiling*, pode ocorrer o aprisionamento de quantidades variáveis de cristais de saturação formados anteriormente ao aprisionamento, resultando em uma grande variação nas salinidades das inclusões, as quais são bastante altas, e um espalhamento maior de pontos nos diagramas, como pode ser observado na **área A da figura 19**.

A **área C** do diagrama da **figura 19** representa IFs aprisionadas acima da curva de imiscibilidade líquido-vapor, com as seguintes prováveis origens: aprisionamento de fluidos homogêneos saturados, ou subsaturados, neste último caso em temperaturas e pressões bastante elevadas.

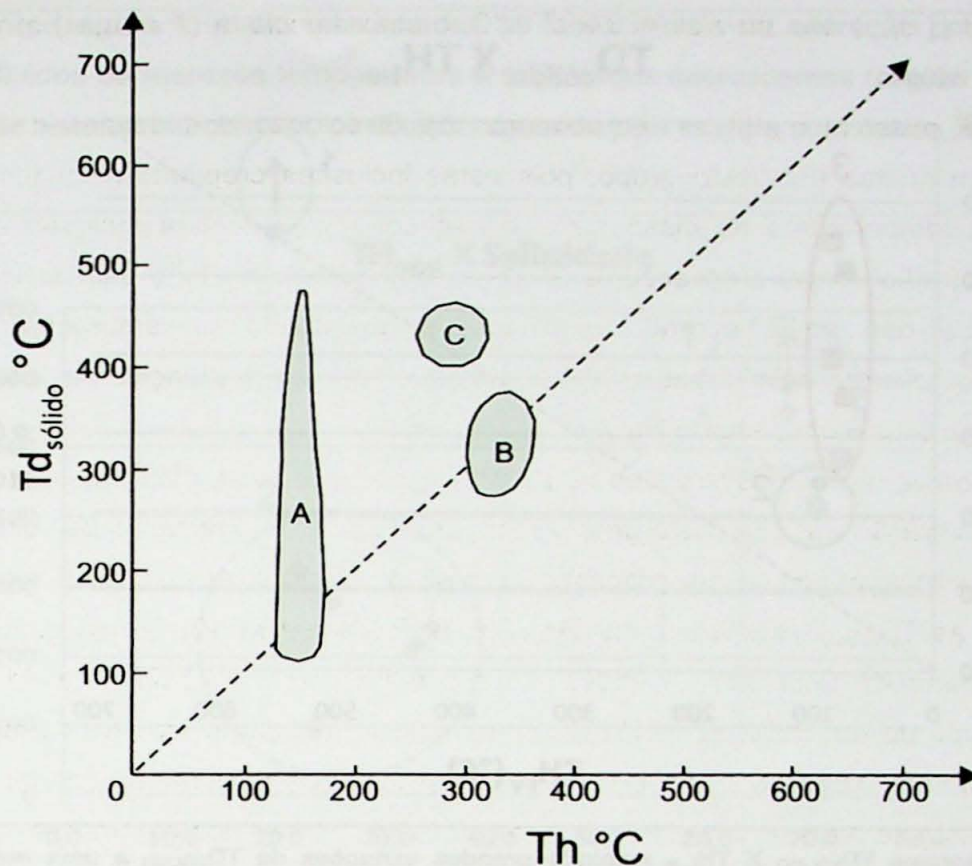


Figura 18. Área C: IFs aprisionadas acima da curva de imiscibilidade líquido-vapor, com as seguintes prováveis origens: aprisionamento de fluidos homogêneos saturados ou subsaturados, neste último caso em temperaturas e pressões bastante elevadas. Indicar o significado de A e de B

Desta forma, este grupo de inclusões com Th_{L-V} elevadas (400 a 570 °C) e salinidades extremamente altas (atingindo 67,5 wt. % NaCl) apresenta as características de uma solução saturada em *boiling*, conforme discutido por Ramboz *et al.* (1982), sendo representado por uma inclusão na **região 1** da **Figura 20**. Outras inclusões com características bastante semelhantes foram analisadas, mas não foram adicionadas ao diagrama da **Figura 20** devido à dificuldade de se obter com precisão as temperaturas envolvidas. Este grupo de inclusões representa os fluidos mais primitivos deste sistema magmático-hidrotermal, sendo responsáveis pelo desenvolvimento da alteração hidrotermal potássica.

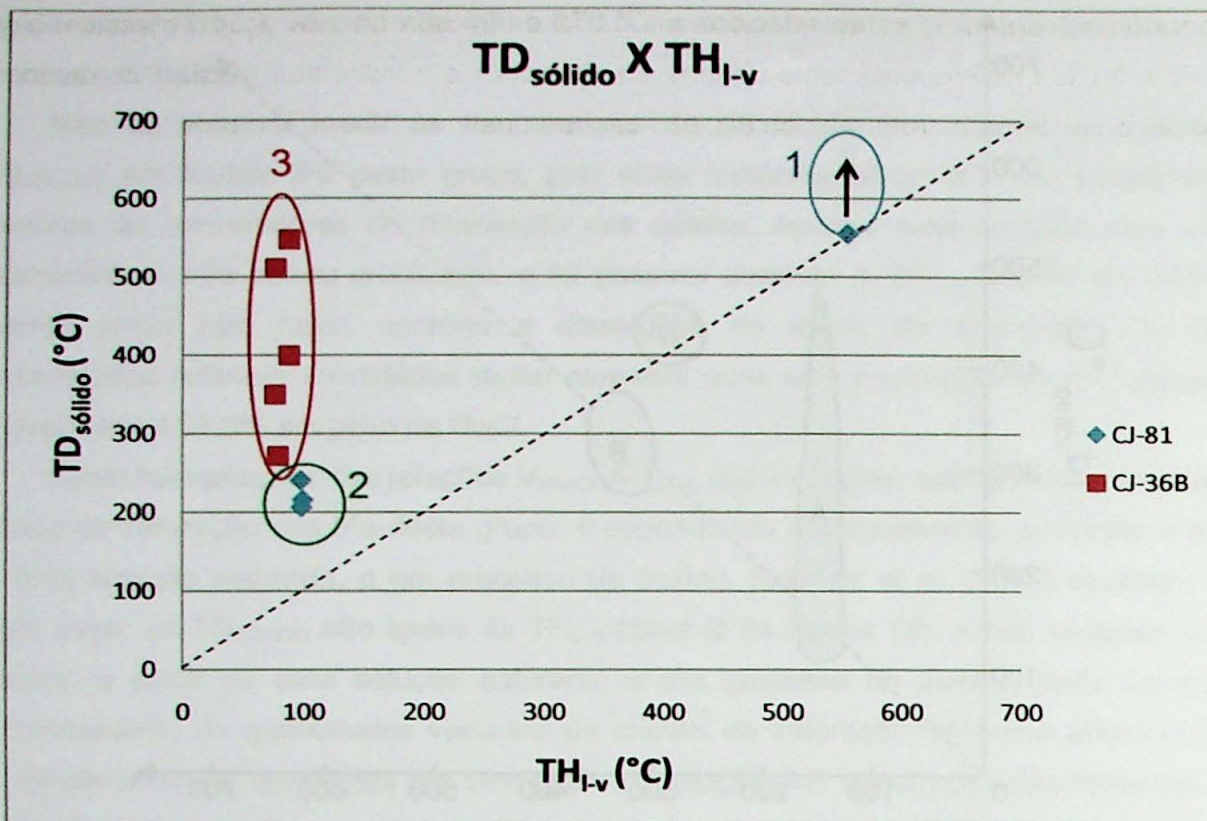


Figura 19. Diagrama $TD_{\text{sólido}} \times TH_{L-v}$ exibindo grandes variações de $TD_{\text{sólido}}$ a uma mesma TH_{L-v} , indicando aprisionamento a partir de uma solução saturada. A seta indica T superiores a 555°C , uma vez que não foi observada a $TD_{\text{sólido}}$ para esta inclusão. A região 1 é destacada em azul, a região 2 em verde, e a 3 em vermelho.

b) Grupo 2

Nesta mesma amostra, ocorre um segundo grupo de inclusões com formas mais irregulares e TH_{TOTAL} menores, com poucas variações na relação $V_{\text{VAPOR}}/V_{\text{TOTAL}}$, e presença de sólidos de saturação em certos casos, implicando em salinidades variáveis, mas bastante altas, com o mínimo de 20,7% em peso eq. de NaCl (região 2 da Figura 21). Este grupo de inclusões apresenta características de aprisionamento de fluidos homogêneos e saturados, ou mesmo subsaturados em maiores condições de temperatura, como pode ser visto na região 2 do diagrama da Figura 20, a qual é semelhante ao campo C da Figura 19 e extraída de Ramboz *et al.* (1982). Desse modo, as TH_{TOTAL} obtidas (207 a 240°C) (região 2 da Figura 20) podem representar as temperaturas mínimas de aprisionamento, embora os valores reais não devam atingir os obtidos para o grupo 1, uma vez que essas inclusões apresentam morfologias mais irregulares e salinidades menores. Este grupo de inclusões, portanto, deve representar fluidos mais evoluídos, e possivelmente com contribuição de outras fontes responsáveis pelas alterações hidrotermais posteriores à alteração hidrotermal potássica.

As relações entre as inclusões destes dois grupos são bem caracterizadas pelo diagrama salinidade $\times TH_{\text{TOTAL}}$ (Fig. 21), no qual as IFs mais salinas e de maiores

temperaturas (**região 1**) estão relacionadas às fases iniciais da alteração potássica, e as demais a fluidos de menores temperaturas e salinidades decrescentes (**região 2**), devido à evolução do sistema hidrotermal, ou diluição causada pela mistura com outros fluidos.

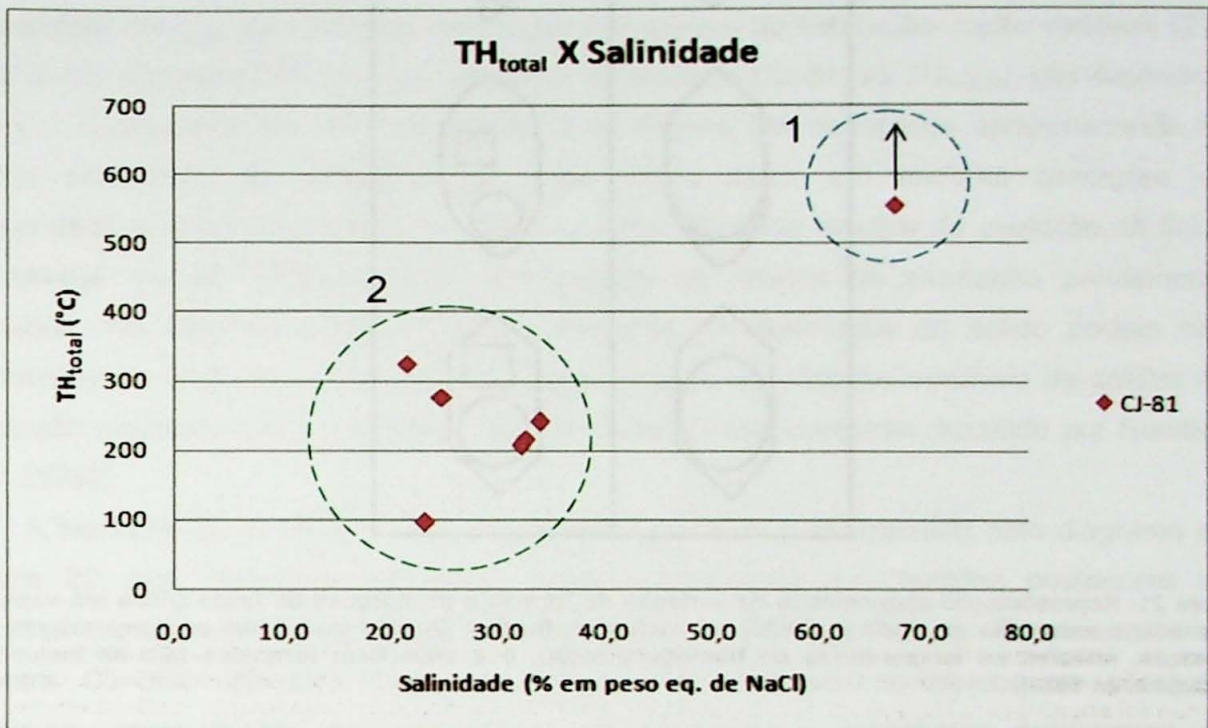


Figura 20. Diagrama TH_{TOTAL} X Salinidade para as IFs da amostra CJ-81. Observar a correlação positiva entre TH_{TOTAL} X Salinidade, ou seja, o decréscimo da salinidade com a diminuição da temperatura do sistema. A seta indica TH_{TOTAL} superiores a 555 °C, uma vez que não foi observada a TD_{SÓLIDO} para esta inclusão. A região 1 é destacada em azul, e a região 2 em verde.

Outro aspecto importante é que as inclusões de maiores temperaturas e salinidades apresentam formas mais regulares, fato que segundo Bodnar *et al.* (1985) é relacionado a aprisionamento em maiores profundidades e temperaturas (Fig. 21).

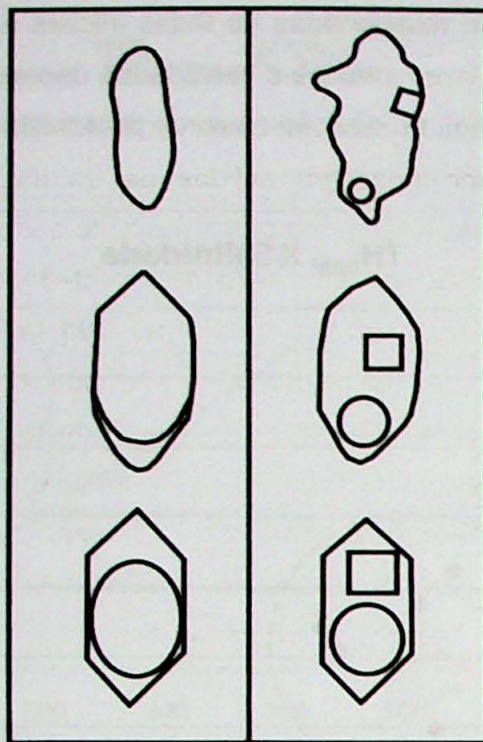


Figura 21. Representação esquemática da variação de formas e proporções de fases (ricas em vapor à esquerda, e saturadas em NaCl à direita) em inclusões fluidas. Quanto mais altas as temperaturas de formação, maiores as temperaturas de homogeneização, e a mais bem formadas são as inclusões (Bodnar *et al.* 1985).

8.1.2. Amostra CJ-36B

As inclusões fluidas presentes na amostra CJ-36B, a qual está afetada por alteração potássica pervasiva, mas de menor intensidade em relação à amostra CJ-81 (Foto 6), são em essência aquosas, com presença de muitos sólidos, incluindo sólidos de saturação (*daughter minerals*) com hábitos cúbicos (halita e silvita), sólidos de saturação não cúbicos (possivelmente CaCl_2 hidratado), além de sólidos ocasionais, sendo estes últimos, em geral, opacos (Fotomicrografia 4).

Da mesma forma como ocorre com a amostra CJ-81, na amostra CJ-36B também são reconhecidos dois grupos distintos de inclusões.

a) Grupo 1

O grupo um é formado por inclusões mais regulares e com TH_{L-V} elevadas (316 °C), mas menores quando comparadas às TH_{L-V} da amostra CJ-81. Não foi possível observar as $\text{TD}_{\text{SÓLIDO}}$ para esse grupo de inclusões, devido a problemas de crepitação antes da dissolução e por ocorrerem em quantidades menores. Este grupo de IFs com salinidades e TH_{L-V} menores às do grupo 1 da amostra CJ-81, podem ser representantes de estágios mais evoluídos da alteração potássica, com temperaturas um pouco mais baixas.

b) Grupo 2

O grupo dois é formado por IFs com TH_{L-V} mais baixas (≈ 95 °C), formas mais irregulares, e muito ricas em líquido com relações V_{VAPOR}/V_{TOTAL} de 0,05 a 0,1. Muitas das inclusões deste segundo grupo possuem sólidos de saturação (halita e/ou silvita) e apresentam TH_{TOTAL} , obtidas pela dissolução dos sólidos de saturação, muito variáveis (272 a 547,8 °C). Do mesmo modo que o grupo 2 da amostra CJ-81, as $TD_{SÓLIDO}$ são superiores à TH_{L-V} , como pode ser visto na região 3 da Figura 20, denotando aprisionamento de fluidos saturados, ou subsaturados, neste último caso, em maiores condições de temperatura. A grande variação nas $TD_{SÓLIDO}$ (Fig. 20) pode resultar da evolução do fluido hidrotermal, ou de aprisionamento heterogêneo de sólidos de saturação previamente formados. No segundo caso, estas temperaturas de dissolução do sólido podem não representar as reais de aprisionamento, uma vez que quantidades variáveis de sólidos de saturação poderiam estar presentes no fluido aprisionado, conforme discutido por Ramboz *et al.* (1982).

A hipótese de variação devido à evolução do fluido é corroborada pelo diagrama da Figura 22, que apresenta correlação positiva, indicando contribuições posteriores de soluções de mais baixas temperaturas e salinidades. Dessa forma, as IFs presentes na amostra CJ-36B registram tanto os fluidos mais primitivos envolvidos na alteração potássica, como fluidos de mais baixas temperaturas e salinidades decorrentes da sobreposição dos processos de alteração hidrotermal subseqüentes.

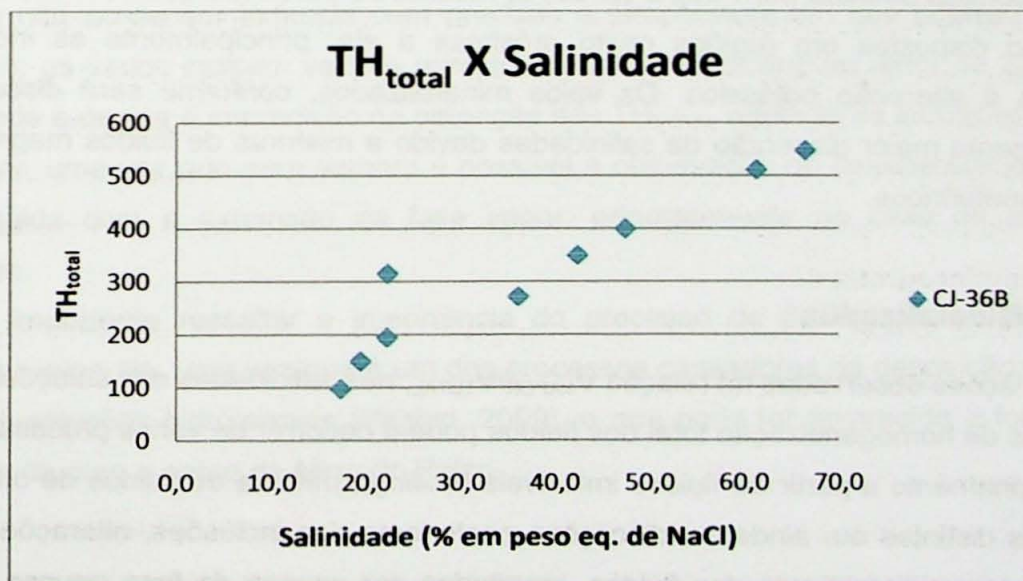


Figura 22. Diagrama TH_{TOTAL} X Salinidade para as IFs da amostra CJ-36B. Observar a marcante correlação positiva entre TH_{TOTAL} X Salinidade, ou seja, o decréscimo da salinidade com a diminuição da temperatura do sistema.

A título de comparação, foi construído um diagrama TH_{TOTAL} X Salinidade com os dados das duas amostras da alteração potássica (CJ-36B e CJ-81), e também de todos os veios mineralizados (Fig. 23), posteriormente foi introduzido neste diagrama o campo 5 da

Figura 17 de Pirajno (2009), campo o qual representa características de um depósito do tipo pórfiro. O eixo X tem variação logarítmica de base 10, este procedimento foi adotado para que o diagrama ficasse compatível com o diagrama da Figura 17.

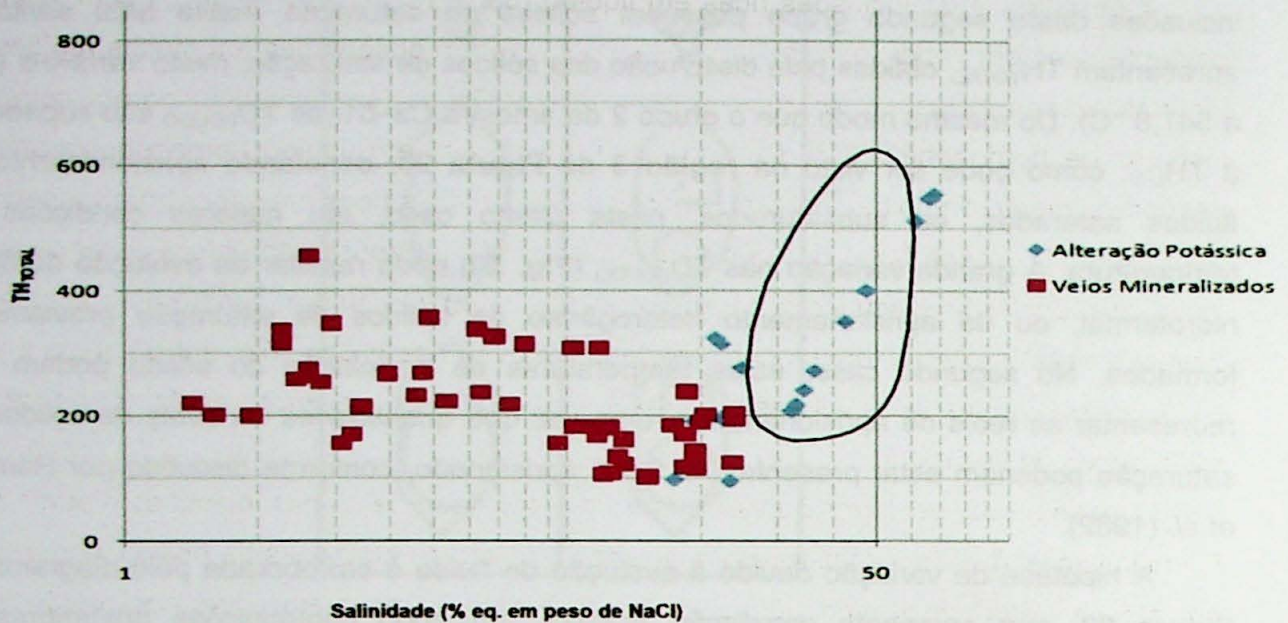


Figura 23. Diagrama TH_{TOTAL} X Salinidade para as IFs das amostras da alteração potássica (CJ-36B e CJ-81) e das amostras de quartzo dos veios mineralizados. O campo destacado em preto representa o campo dos pórfiros, definido por Pirajno (2009). O eixo X do diagrama tem variação logarítmica de base 10.

É possível concluir que a muitas das inclusões estudadas se encontram dentro do campo dos pórfiros definido por Pirajno (2009) e, mesmo as inclusões que estão fora deste campo estão dispostas em regiões muito próximas a ele, principalmente as inclusões relacionadas à alteração potássica. Os veios mineralizados, conforme será discutido a seguir, apresenta maior dispersão de salinidades devido a misturas de fluidos magmáticos com fluidos meteóricos.

8.2. Veios Mineralizados

As variações observadas na relação V_{VAPOR}/V_{TOTAL} , nas salinidades das soluções e nas temperaturas de homogeneização total dos fluidos podem decorrer de vários processos, tais como aprisionamento a partir de fluidos imiscíveis (*boiling*), mistura de fluidos de origens e composições distintas ou, ainda, modificações posteriores das inclusões, alterações estas posteriores ao aprisionamento dos fluidos, resultadas por escape da fase aquosa ou por *necking down*.

8.2.1. Evidências de boiling e de mistura de fluidos

Coexistência de inclusões ricas em líquido (baixa razão $V_{\text{VAPOR}}/V_{\text{TOTAL}}$) com inclusões bastante ricas em vapor (alta razão $V_{\text{VAPOR}}/V_{\text{TOTAL}}$) foram observadas em muitas regiões das lâminas. Essas inclusões as quais apresentaram TH_{TOTAL} semelhantes, porém com tipos distintos de homogeneização, sendo que as mais ricas em líquido homogeneizaram pelo desaparecimento da bolha de vapor, enquanto que as mais ricas em vapor homogeneizaram pela expansão dessa fase. Essas características indicam aprisionamento a partir de fluidos imiscíveis, conforme discutido por Ramboz *et al.* (1982). Os autores também enfatizam que, devido a esse processo, pode ocorrer grande variação nas proporções entre líquido e vapor e discute que os menores valores de TH_{TOTAL} constituem as temperaturas de aprisionamento mais próximas das reais.

Desse modo, os dados obtidos sugerem o aprisionamento das inclusões a partir de um fluido imiscível devido a oscilações na pressão do sistema em zonas de *boiling*, como ocorre em alguns sistemas do tipo pórfiro. Essas inclusões apresentam contornos relativamente mais regulares característicos de aprisionamento mais precoce, indicando que o início do processo de *boiling* pode ter sido iniciado em temperaturas relativamente altas.

Processos contínuos de *boiling* até temperaturas mais baixas também são sugeridos pelo diagrama que relaciona a temperatura de homogeneização total com a densidade do fluido ($TH_{\text{TOTAL}} \times d_{\text{TOTAL}}$) (**Fig. 24**), cujos dados constituem parte da curva *solvus* do sistema. Embora não possa ser indicada com precisão a temperatura em que ocorreu o início do processo, os dados indicam valores mínimos de início de *boiling* ao redor de 350 °C. Essa dificuldade é devida à imprecisão na obtenção das TH_{TOTAL} relativas às inclusões muito ricas em vapor, uma vez que nem sempre é possível a observação do desaparecimento total da fase líquida com a expansão da fase vapor, principalmente no caso de formas mais regulares.

É importante ressaltar a importância do processo de *boiling* para a formação de depósitos minerais, uma vez que é um dos processos causadores da deposição de metais a partir de soluções hidrotermais (Pirajno, 2009), o que pode ter favorecido a formação dos minérios de ouro e cobre da Mina do Palito.

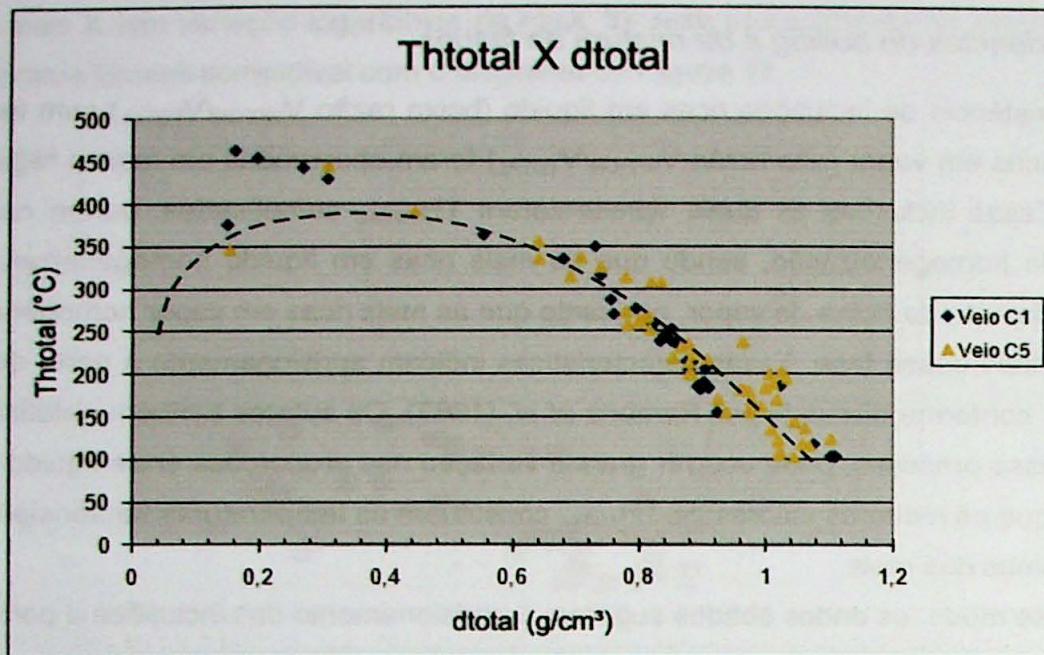


Figura 24. Diagrama relacionando as temperaturas de homogeneização total com as densidades dos fluidos. A linha tracejada representa uma curva *solvus* esquemática para o sistema aquoso salino.

O aprisionamento a partir de fluidos imiscíveis também é sugerido pelo diagrama que relaciona a TH_{TOTAL} com a salinidade (Fig. 25), o qual exibe uma correlação negativa, indicativa de *boiling* contínuo, como discutem Shepherd *et al.* (1985) e Wilkinson (2001). A dispersão dos dados observada no diagrama pode ser devida à ocorrência de etapas simultâneas de mistura de fluidos durante o aprisionamento das inclusões.

O diagrama que relaciona a salinidade com as razões V_{VAPOR}/V_{TOTAL} (Fig. 26) reforça a interpretação de ocorrência de *boiling* no sistema. Diagrama este que exibe um decréscimo na salinidade do fluido com o aumento da razão V_{VAPOR}/V_{TOTAL} , relação que é discutida por Bowers & Helgeson (1983), que mostram que com o processo de *boiling*, as inclusões mais ricas em vapor devem apresentar salinidades inferiores às mais ricas em líquido.

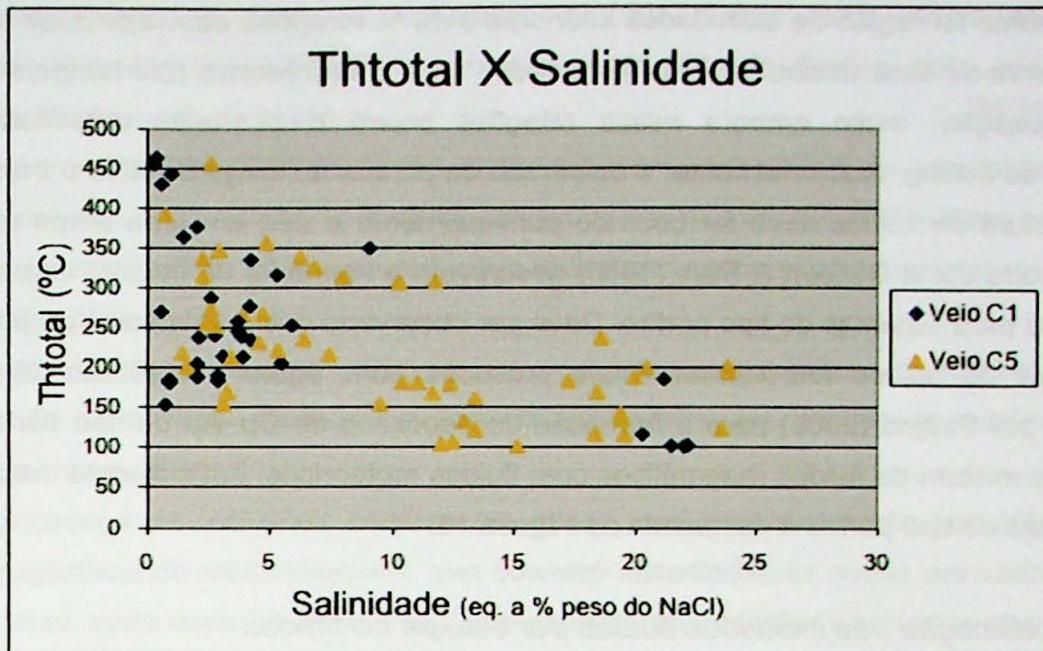


Figura 25. Diagrama relacionando as temperaturas de homogeneização total com as salinidades das soluções aquosas, na qual é observado um *trend* indicativo de *boiling*, com dispersões sugestivas de misturas de fluidos.

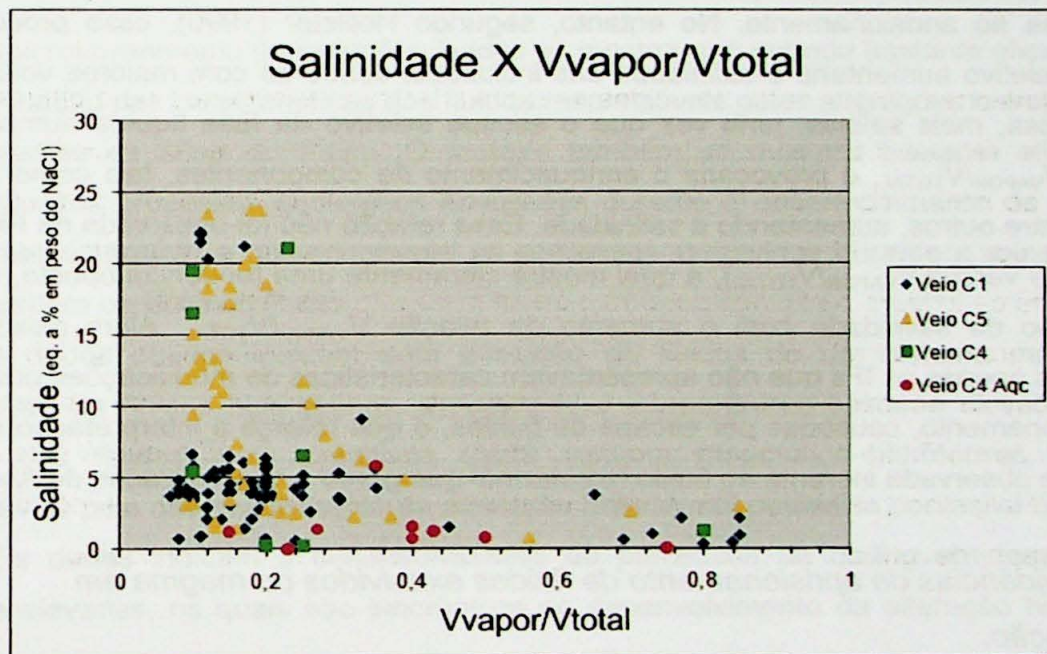


Figura 26. Diagrama relacionando as salinidades das soluções aquosas com as variações volumétricas da fase vapor. De modo geral ocorre um decréscimo na salinidade com o aumento da proporção da fase vapor, o que é indicativo de *boiling*.

O diagrama da **Figura 26** exibe certa dispersão de pontos, dispersões essas interpretadas como resultado de etapas de mistura dos fluidos originais com fluidos, provavelmente meteóricos com temperaturas mais baixas, resultando em uma dispersão na salinidade das inclusões. Essas etapas de misturas de fluidos, durante o aprisionamento de certas inclusões, também são sugeridas pela dispersão de pontos no diagrama TH_{TOTAL} versus salinidade (**Fig. 25**). A disposição dos pontos sugere uma correlação positiva,

principalmente na região de salinidades inferiores a 10 % em peso equivalente de NaCl, ou seja, observa-se uma diminuição das salinidades com o decréscimo das temperaturas de homogeneização, muito embora essas relações sejam mascaradas pelo forte *trend* indicativo de *boiling*. Adicionalmente, a dispersão de pontos ao longo de todo o *trend* indica que a mistura de fluidos deve ter ocorrido continuamente e não em uma etapa única, do mesmo modo como Guilbert & Park (1986) descrevem a interação de fluidos magmáticos e meteóricos para sistemas do tipo pórfiro. Deve ser observado que a existência de processos de mistura de fluidos hidrotermais mais precoces com águas meteóricas também é apontada por Pirajno (2009) para a formação de depósitos de Cu–Au do tipo pórfiro. Esta relação de mistura de fluidos magmáticos com fluidos meteóricos, em sistemas magmático–hidrotermais do tipo pórfiro é destacada na **Figura 16**.

8.2.2. Modificação das inclusões fluidas por escape de fluidos

As grandes variações nas TH_{TOTAL} , salinidades, V_{VAPOR}/V_{TOTAL} e densidades das IFs podem ser indicativas de escape seletivo da fase aquosa líquida durante processos posteriores ao aprisionamento. No entanto, segundo Hollister (1990), esse processo de escape seletivo aumentaria a salinidade das inclusões, sendo as com maiores volumes de fase gasosa, mais salinas, uma vez que o escape seletivo da fase líquida aumentaria a relação V_{VAPOR}/V_{TOTAL} , e provocaria o enriquecimento de componentes, tais como $CaCl_2$ e NaCl, dentre outros, aumentando a salinidade. Essa relação não foi observada na **Figura 26** (salinidade *versus* V_{VAPOR}/V_{TOTAL}), a qual mostra claramente uma tendência oposta, com um decréscimo da salinidade com o aumento da relação V_{VAPOR}/V_{TOTAL} . Além disso, foram estudadas apenas as IFs que não apresentavam características de modificações posteriores ao aprisionamento, causadas por escape de fluidos, o que reforça a interpretação de ser a salinidade observada inerente ao fluido hidrotermal que gerou a mineralização de Au–(Cu).

8.2.3. Evidências de aprisionamento de fluidos exsolvidos do magma em cristalização.

Certas inclusões com V_{VAPOR}/V_{TOTAL} de ~0,70 a 0,84, que apresentam salinidades muito baixas (0,6 a 1,5 % em peso eq. de NaCl) e temperaturas de homogeneização total, para o vapor, bastante elevadas (429 a 462 °C), constituem um grupo distinto na **Figura 24** (TH_{TOTAL} X d). Estas inclusões concentram-se acima da curva de *solvus*, tendo sido aprisionadas anteriormente aos processos de *boiling*. Suas morfologias são relativamente regulares, o que, segundo Bodnar *et al.* (1985), seria indicativo de aprisionamento mais antigo e a maiores temperaturas.

Como as TH_{TOTAL} , no caso de ausência de imiscibilidade de um fluido aquoso, representam apenas as condições mínimas de formação, sendo nessas inclusões já

relativamente altas, é bastante sugestivo de que houve uma etapa anterior de aprisionamento, em temperaturas superiores a 460 °C, de fluidos ricos em vapor e exsolvidos diretamente do magma.

As características discutidas são coerentes com uma etapa de aprisionamento de fluidos exsolvidos diretamente do magma, processo que foi também evidenciado por Bodnar (1995) ao interpretar a formação de inclusões semelhantes em veios de quartzo–molibdenita de mineralizações do tipo pórfiro.

As inclusões desse tipo ocorrem em pequenas quantidades, constituindo apenas relíquias de uma fase precoce, a qual foi obliterada por processos posteriores de aprisionamento de fluidos.

A presença de inclusões constituídas quase que exclusivamente por sólidos, com feições sugestivas de *melt inclusions*, que ocorrem associadas às outras em várias regiões das amostras, seria mais um indicativo das temperaturas elevadas envolvidas nas primeiras etapas de aprisionamento dos fluidos e dos *melts* silicáticos.

9. CONCLUSÕES

A microtermometria de inclusões fluidas se mostrou um método bastante eficiente para a determinação das características dos fluidos responsáveis pelas alterações hidrotermais, e mineralizantes da Mina do Palito. O método também se mostrou bastante eficaz para elucidação dos processos geológicos envolvidos durante o desenvolvimento da alteração hidrotermal potássica, e posteriormente os processos envolvidos durante a mineralização auro–cuprífera da Mina do Palito.

Os dados obtidos indicam uma evolução de fluidos de um sistema magmático–hidrotermal. Os fluidos hipersalinos, aprisionado a temperaturas bastante elevadas são o registro dos fluidos mais primitivos deste sistema magmático–hidrotermal, e foram responsáveis pelo desenvolvimento da alteração hidrotermal potássica pervasiva do Granito Palito. Os dados indicam o desenvolvimento de processos de *boiling* em temperaturas bastante elevadas, os quais são sincrônicos ao desenvolvimento da alteração hidrotermal potássica.

Com o resfriamento e evolução geoquímica dos fluidos do sistema, acompanhados de variações nas pressões litostáticas e hidrostráticas do sistema geológico, houve o início dos principais processos de *boiling* neste sistema hidrotermal, sendo processo o principal responsável pela mineralização das rochas encaixantes e principalmente dos veios de quartzo, com etapas concomitantes de misturas de fluidos magmáticos com fluidos meteóricos, sendo estas últimas etapas evidenciadas pelas amplas variações nas salinidades dos fluidos, e pelas dispersões dos pontos nos diagramas construídos.

Pelo exposto, as características dos fluidos deste sistema hidrotermal são compatíveis com uma origem magmática–hidrotermal do tipo pórfiro para a mineralização. Nesse caso é

esperado um decréscimo na salinidade das soluções nos veios mineralizados em função da separação dos fluidos e da mistura com água meteórica durante a alteração sericítica, sincrônica às mineralizações. Os resultados obtidos são reforçados pelas interpretações feitas por com base na geologia e nos tipos e estilos da alteração hidrotermal (Echeverri-Misas, 2010) de que essa mineralização é do tipo pórfiro (*porphyry-type*) e não tem sua gênese vinculada com sistemas orogênicos mesotermiais.

A descrição deste tipo de mineralização, o qual ainda é pouco conhecido no Brasil, apesar de ser um dos principais depósitos fornecedores de cobre e ouro em todo o mundo, principalmente na região Andina e em outros cinturões colisionais com subducção de placa oceânica, tem implicação direta na reavaliação do potencial mineral da Província Aurífera do Tapajós, uma vez que mineralizações do tipo pórfiro, de modo geral, não ocorrem isoladas em apenas um corpo granítico, além deste fato, os sistemas hidrotermais do tipo pórfiro têm uma íntima relação com epitermais, as quais são importantes fontes de ouro e prata, e já foram descritas na PAT por Juliani *et al.* (2002; 2005).

Para completar o quadro de evolução de fluidos da Mina do Palito seria ainda interessante estudar as inclusões fluidas associadas aos veios não mineralizados, o que não pode ser contemplado, por questão de tempo, nesse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M.E.; Brito, M.F.L.; Ferreira, A.L.; Monteiro, M.A.S. 2000. **Geologia e recursos minerais da Folha Mamãe Anã (SB.21-V-D). Estados do Amazonas e Pará. PROMIN Tapajós**. CPRM, Brasília, Brazil, Escala 1:250.000. [CD-ROM].
- Almeida, M.E.; Brito, M. de F.L. de; Ferreira, A.L.; Monteiro, A.S.; Popini, M.V.F.; Dreher, A.M. 1998. Mineralizações auríferas associadas a vulcanismo ácido e intermediário na Folha Vila Mamãe Anã, Província Mineral do Tapajós. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40, 1998, Belo Horizonte, MG. **Anais...**, Belo Horizonte, SBG Núcleo MG. p. 148.
- Almeida, C.A.S.; Collyer, T.A.; Pereira, J.L.; Seabra, A.S.; Furtado, A.M.M.; Soubés, L.F. 1977. **Relatório final de reconhecimento (1). Projeto Santarém-Cachimbo-pesquisa Mineral. Pólo Amazônico/Pólo Tapajós**. Convênio SUDAM/IDESP.
- Bakker, R.J. 2003. Package FLUIDS 1: Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties. **Chemical Geology**, **194**: 3–23.
- Bettencourt, J.S.; Tosdal, R.M.; Leite Jr., W.B.; Payolla, B.L. 1995. Overview of the rapakivi granites of the Rondônia Tin Province (RTP). IN: Bettencourt, J.S. & Dall'Agnol, R. (eds). **The rapakivi granites of the Rondônia Tin Province and associated mialeralization**. Symposium on rapakivi granites and related rocks, excursion guide. UFPA, Belém.
- Bodnar, R.J., 1985, Pressure-volume-temperature-composition (PVTX) properties of the system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures: Unpublished PhD dissertation thesis, The Pennsylvania State University, 183 p.
- Bodnar, R.J., 1995. Fluid inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. In: Thompson, J.F.H. (ed.). **Magma, Fluids, and ore deposits**. Vitória, British Columbia, Mineralogical Association of Canada Short Course Series, **23**: 139–152.
- Boone, G.M. 1969. Origin of clouded feldspars: petrologic contrasts in a granitic porphyry intrusion. **American Journal of Sciences**, **267**: 633–668
- Bowers, T.S.; Helgeson, H.C. 1983. Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O–CO₂–NaCl on phase relations in geologic systems: equation of state H₂O–CO₂–NaCl fluids at high pressures and temperatures. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **47**: 1247–1275.
- Dall'Agnol, R.; Costi, H.T.; Leite, A.A. da; Magalhães, M.S. de; Teixeira N.P. 1999. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. **Precambrian Research**, **95**: 9–39.
- Dall'Agnol, R.; Lafon, J.M.; Macambira, M.J.B. 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the central Amazonian Province, Amazonian Craton: geochronological, geochemical aspects. **Mineralogy and Petrology**, **50**: 113–138.
- Dall'Agnol, R.; Pichavant, M.; Champenois, M. 1997. Iron-titanium oxide minerals of the Jamon Granite, Eastern Amazonian region, Brazil: implications for the oxygen fugacity in Proterozoic A-type granites. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **69**: 325–347.
- Davis, D.W.; Lowenstein, T.K.; Spencer, R.J. 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O, NaCl–MgCl₂–H₂O, and NaCl–CaCl₂–H₂O. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, **54**: 591–601.

- Echeverri-Misas C.M. 2010. **Evolução magmática, alteração hidrotermal e gênese da mineralização de ouro e cobre do Palito, Província Aurífera do Tapajós (PA)**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 178 p.
- 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. PROMIN Tapajós**. CPRM, Manaus, Escala 1:250.000 [CD-ROM].
- Guilbert, J.M.; Park, C.F. 1986. **The geology of ore deposits**. Freeman, New York, San Francisco, 199p.
- Hollister, L.S. 1990. Enrichment of CO₂ in fluid inclusions in quartz by removal of H₂O during crystal-plastic deformation. **Journal of Structural Geology**, **12**: 895–901.
- Hollister L.S. & Crawford M.L. 1981. Fluid Inclusions: Applications to Petrology. Mineralogical Association of Canada, Calgary, 304 pp.
- Juliani, C. 2009. **Modelagem genética do depósito de Au-(Cu) do Palito e sua relação com as mineralizações do tipo pórfiro e epitermais associadas ao magmatismo ácido paleoproterozóico na Província Aurífera do Tapajós**. Relatório Científico, CNPq-CT Mineral Proc. 505851/2004-0, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Juliani C., Correa-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**, **119**: 225–256.
- Juliani C., Rye R.O., Nunes C.M.D., Snee L.W., Correa-Silva R.H., Monteiro L.V.S., Bettencourt J.S., Neumann R., Neto A.A. 2005. Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints. **Chemical Geology**, **215**(1–4): 95–125.
- Klein, E.L.; Vasquez, M.L. 2000. **Geologia e recursos minerais da Folha Vila Riozinho (SB.21-Z-A). Estado do Pará. PROMIN Tapajós**. CPRM, Brasília, Escala 1:250.000 [CDROM].
- Lamarão, C.N.; Lafon, J.M.; Lima, E.F. 1999. As associações vulcânicas e plutônicas de Vila Riozinho e Morais Almeida, Província Aurífera do Tapajós, SW do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 1, 1999, Gramado, RS. **Boletim de Resumos...**, Gramado, p. 93.
- Pessoa, M.R.; Santiago, A.F.; Andrade, A.; Nascimento, J.O.; Santos, J.O.; Oliveira, J.R.; Lopes, R.C.; Prazeres, W.V. 1977. **Projeto Jamanxim. Relatório Final**. 1(A), DNPM/CPRM.
- Pirajno, F. 2009. **Hydrothermal processes and mineral systems**. Australia, Springer, Geological Survey of Western Australia, 1250 p.
- Ramboz, C.; Pichavant, M.; Weisbrod, A. 1982. Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. **Chemical Geology**, **37**: 29–48.
- Ramgrab, G.E.; Santos, J.O.S. 1974. O Grupo Uatumã. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre, RS. **Anais...**, Porto Alegre, SBG. p. 87–94.
- Ricci, P.S.F.; Santos, A.; Klein, E.L.; Jorge-João, X.S.; Martins, R.C. 1999. Suíte Intrusiva Creporizão – Província Tapajós; proposta e critérios de definição. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 6, 1999, Manaus, AM. **Anais...**, Manaus, p. 519–522.
- Roedder E. 1972. The composition of fluid inclusions. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, 440JJ, 164p.

- Roedder E. 1982. Fluid Inclusions in gemstones: Valuable Defects. *In: International Gemological Symposium, Santa Monica. Geological Institute of America, Atas*, p. 479–502.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. *In: Ribbe, P.H. (Ed.). Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy*, v. 12. Virginia, Mineralogical Society of America, 646 p.
- Santos, J.O.S.; Groves, D.I.; Hartmann, L.A.; Moura, M.A.; Mcnaughton, N.J. 2001. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós–Parima orogenic belt, Amazon craton, Brazil. **Mineralium Deposita**, **36**: 453–488.
- Santos, J.O.S.; Hartmann, L.A.; Gaudette, H.E. 1997. Reconnaissance U/Pb in zircon, Pb/Pb in sulphides and review of Rb/Sr geochronology in Tapajós gold Province, Pará/Amazonas States, Brazil. *In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY*, 1, 1997, Campos do Jordão, SP. **Extended Abstracts...**, Campos do Jordão, p. 280–282.
- Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., Mcnaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A New understanding of the provinces of the Amazon craton based on integration of field mapping and U–Pb and Sm–Nd geochronology. *Gondwana Research*, **3(4)**: 453–488.
- Shepherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H.H. 1985. **A practical guide to fluid inclusions studies**. Blackie and Son Ltd, New York, 239 p.
- Silva, J.M. 2004. **Petrogênese da mineralização aurífera filoniana do Palito (SW do Estado do Pará) e de suas rochas hospedeiras: alteração hidrotermal e gênese**. São Paulo, 56p. Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Silva, G.G.; Lima, J.J.C.; Andrade, A.R.F.; Issler, R.S.; Guimarães, G. 1974. **Geologia da Folha SC. 22 – Tocantins. Projeto RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, DNPM.
- Tassinari C.C.G., Macambira M.J.B. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22(3)**: 174–182.
- Touret J.L.R. 1984. Fluid inclusions in the lithosphere as indicated by fluid inclusions. *Mitteilungen Oesterreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, **129**: 31–38.
- Vasquez, M.L.; Klein, E.L.; Quadros, M.L.E.S.; Bahia, R.B.C.; Santos, A. dos; Ricci, P.S.F.; Sachett, C.R.; Silva, C.M.G.; Macambira, M.J.B. 1999. Magmatismo Uatumã na Provincia Tapajós – novos dados geocronológicos. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 6., 1999, Manaus, AM. **Anais...** Manaus, SBG/Núcleo Norte, p. 471–474.
- Wilkinson, J. 2001. Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits. **Lithos**, **55**: 229–272.
- Yanatieva, O.K. 1946. Solubility polytherms in the systems $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$. **Zh. Prikl. Khim.**, **19**: 702–722

