



Caracterização dos fluidos hidrotermais do corpo Sequeirinho do depósito Cu-Au do Sossego, região de Carajás (PA), Brasil

A.G.N. Rosa¹ & R.N. Villas²

1 Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica do CG/UFPA, agnr@click21.com.br

2 Departamento de Geologia do CG/UFPA, netuno@ufpa.br

Abstract CHARACTERIZATION OF HYDROTHERMAL FLUIDS ASSOCIATED WITH THE SEQUEIRINHO OREBODY, SOSSEGO Cu-Au DEPOSIT, CARAJÁS REGION (PA), BRAZIL. Microthermometric studies of fluid inclusions (FI) trapped in quartz, scapolite, apatite and calcite crystals from different rocks of the Sequeirinho orebody, Sossego Cu-Au deposit, reveal aqueous fluids that may be chemically represented by the $H_2O-NaCl-CaCl_2$, $H_2O-NaCl-CaCl_2-FeCl_2$ and $H_2O-NaCl-FeCl_2$ systems. These two-, three- and multi-phase FI show variable salinity (0.2 to 53.3% weight % eq. NaCl), ice melting temperatures over the range of -0.5 to -24°C and more frequent homogenization temperatures ranging from 125 to 275°C. In terms of the main solutes, saturated FI corresponding to the $H_2O-NaCl-CaCl_2$ have salinity of 15-26 weight % NaCl and 15-23 weight % $CaCl_2$. The evolution of the Sossego hydrothermal system involved two primary fluids ($H_2O-NaCl-CaCl_2$ and $H_2O-NaCl-FeCl_2$). As these fluids gradually mixed, they generated a third fluid ($H_2O-NaCl-CaCl_2-FeCl_2$) which is interpreted to be responsible for the mineralization and associated alteration. All fluids show evidences of dilution most likely by superficial water. The origin of the fluids may be magmatic and/or metamorphic. Scapolitization, albitization, Fe- metasomatism, very high fluid salinity and $^{18}O_{fluid} > 12\text{‰}$ support some metamorphic contribution.

Keywords: Sossego Cu-Au Deposit, hydrothermal alteration, fluid inclusions, fluid mixing.

INTRODUÇÃO O depósito cupro-aurífero do Sossego é formado pelos corpos Sequeirinho e Sossego, que, juntos, detêm mais de 90% das reservas, e pelos corpos menores Pista, Baiano e Curral. Está situado a cerca de 25 km a NW da cidade de Canaã dos Carajás, no estado do Pará.

O presente trabalho trata da caracterização dos fluidos hidrotermais relacionados com o corpo Sequeirinho, com vista a compreender a evolução química e termal do paleossistema hidrotermal responsável pela alteração e mineralização, além de apresentar uma breve comparação com os fluidos de outros depósitos Cu-Au da Província Mineral de Carajás (PMC). Para alcançar esse objetivo, foram utilizados dados da literatura, de campo, petrográficos, microtermométricos e de microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS).

CONTEXTO GEOLÓGICO DO DEPÓSITO Cu-Au DO SOSSEGO Geologicamente, o depósito cupro-aurífero do Sossego encontra-se ao sul do sistema transcorrente Carajás, na zona de contato entre as rochas do Complexo Xingu, ao sul, e do Grupo Grão Pará, ao norte, ambos de idade arqueana.

Na área do depósito Cu-Au do Sossego, registra-se um conjunto de zonas de cisalhamento transcorrentes destrais, de natureza rúptil e direção NE-SW com altos ângulos de mergulhos para SE. Essas zonas formam corredores de grande intensidade de deformação e, nas suas vizinhanças, promoveram uma

rotação horária da foliação regional e, no seu interior, além de intenso fraturamento, a geração de rochas cataclásticas, nas quais estão incluídos os corpos mineralizados de aspecto brechóide (Moraes & Alkmim 2005).

TIPOS LITOLÓGICOS NA ÁREA DO DEPÓSITO Dentre outras rochas, ocorrem na área do depósito granitos (GRA), gabros (GBA), biotita xistos (BIX), magnetitos (MAG) e os corpos de minério (BSE).

Os granitóides e as rochas máficas são rochas fortemente alteradas e mostram diferentes graus de deformação. Nas primeiras, observam-se variedades isotropas a milonitizadas, algumas com textura porfírica relativamente bem preservada. Com base em dados petrográficos, foi possível inferir que os protólitos dos milonitos consistiram de sienogranitos a dioritos (albita, quartzo, feldspato potássico, clorita, fengita, epidoto, actinolita e alanita), sendo os quartzodioritos os termos dominantes, enquanto que as rochas máficas correspondem a gabros e/ou diabásios (epidoto, clorita, albita, Cl-K-Fe-hastingsita, escapolita, magnetita, quartzo, além de actinolita). Os principais processos hidrotermais que atuaram nessas rochas foram albitização, sericitização, silicificação, cloritização, epidotização, actinolitização e escapolitização, sendo os dois primeiros mais comuns nas rochas graníticas e os dois últimos nas rochas máficas.



Os BIX constituem rochas via de regra bastante foliadas e recrystalizadas, que ressaltam a alternância de finas bandas claras (ricas em quartzo e/ou escapolita) e escuras (ricas em biotita, Cl-K-Fe-hastingsita e turmalina). Essas rochas podem representar granitóides milonitizados ou metaexalitos (Villas *et al.* 2005). Os processos de biotitização e escapolitização foram marcantes nessas rochas.

Os magnetitos são caracterizados pela abundância de magnetita (> 50 %) e por quantidades subordinadas de epidoto, actinolita, clorita e subordinadamente calcopirita, sendo um produto de forte metassomatismo de ferro.

Os corpos de minério são formados essencialmente por sulfetos, magnetita, clorita, actinolita, escapolita, apatita, Cl-K-Fe hastingsita, biotita e quartzo, os primeiros representados principalmente por calcopirita com quantidades subordinadas de siegenita e pirita. Eles têm aspecto brechóide decorrente da presença de “clastos” angulosos a subarredondados de grãos e agregados de magnetita e actinolita, dispersos em matriz rica em sulfetos.

MINERALIZAÇÃO E ROCHAS ENCAIXANTES

O minério do corpo do Sossego tem forma irregular e se localiza em rochas granófiras que se associam espacialmente com granitos, enquanto o corpo Sequeirinho apresenta forma alongada e está hospedado nas rochas máficas hidrotermalizadas associadas com granitos. Ambos os corpos de minério ocorrem próximos a zonas de falhas, limitando os BIX.

Nos corpos de minério, os sulfetos (calcopirita ± siegenita ± pirita) apresentam granulação fina (< 1 mm) a grossa (> 5 mm), sendo comuns concentrações maciças (> 50% de sulfetos) a semimacías. Ocorrem também em *stockworks* e disseminações.

ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS Foram estudadas inclusões fluidas (IF) nos granitos, gabros, biotita-xistos, magnetitos e corpos de minério.

Técnicas analíticas Nas IF foram realizados testes de resfriamento para determinação das temperaturas eutética, de fusão do gelo e fusão do hidrato e de aquecimento para determinação das temperaturas de homogeneização, que permitiram estimar a composição, densidade e salinidade das soluções, bem como a temperatura mínima de aprisionamento. As medições microtermométricas foram feitas em uma platina Linkam THMSG 600. A identificação dos

minerais contidos em inclusões fluidas crepitadas foi feita em um equipamento MEV modelo LEO-1430.

Petrografia das inclusões fluidas Foram examinadas cerca de 300 IF, todas elas aquosas, aprisionadas em quartzo, leve a moderadamente leitoso (BSE, BIX, GBA, GRA), escapolita (BSE), apatita (MAG) e calcita (GRA).

Quartzo Nesse mineral distinguem-se IF primárias (Fig. 1A), pseudo-secundárias (Fig. 1B) e secundárias, as primeiras sendo as mais abundantes e as últimas observadas ao longo de trilhas intercristalinas. Elas mostram formas irregulares (predominantes), arredondadas a subarredondadas e tamanho que varia de 4 a 14 µm. Trata-se de IF com grau de preenchimento (F) em geral próximo de 90%, mas que pode atingir 20%. À temperatura ambiente, são monofásicas (L), bifásicas (L+V), trifásicas (L+V+S) e polifásicas (L+V+S+S). Nas inclusões trifásicas, a fase sólida é formada principalmente por cristais de halita, que apresentam forma retangular a quadrada, e tamanho inferior a 6 µm. Com base nas análises no MEV, esse haleto contém pequenas quantidades de Ca e K; em outras IF, o mineral de saturação é a silvita ou uma solução sólida entre halita e silvita. Em algumas IF, ocorrem inclusões sólidas de hematita, com forma subarredondada e tamanho inferior a 6 µm, e provavelmente de sulfetos (Fig.1C).

Escapolita As raras IF contidas nos cristais de escapolita são, no geral, bifásicas e primárias, de formas irregulares a subarredondadas (Fig.1D). O grau de preenchimento é de cerca de 90% e as dimensões não ultrapassam 8 µm.

Apatita Nos cristais de apatita, as IF chegam a 14 µm. São, em geral, primárias e pseudo-secundárias, de formas predominantemente retangulares, com raras irregulares. A maioria das IF é bifásica, no entanto, raras trifásicas também ocorrem (Fig.1E). O grau de preenchimento varia de 60% a 90%.

Calcita Com relação à origem foram identificadas apenas IF primárias (Fig.1F), que têm forma de cristal negativo (mais comum) a irregular. O grau de preenchimento varia entre 90% e 95% e o tamanho entre 2 e 12 µm. Elas são bifásicas (L+V) ou trifásicas, a fase sólida sendo predominantemente cristais de halita, que apresentam forma subarredondada e tamanho inferior a 2 µm.

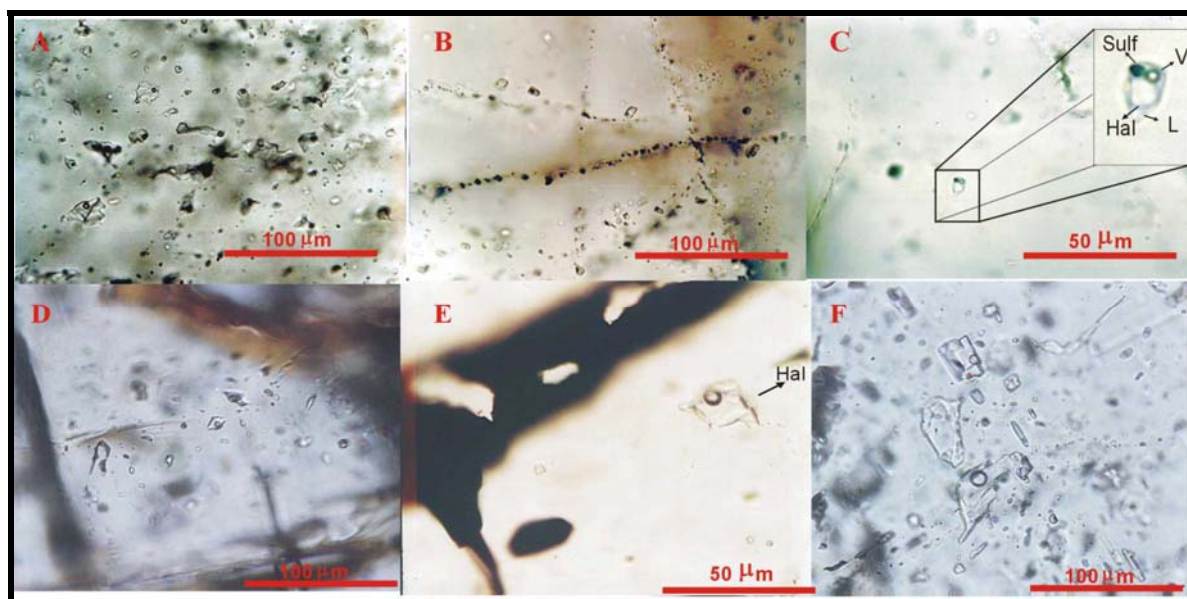


Figura 1. Fotomicrografia de IF aquosas: A) bifásicas primárias hospedadas em cristal de quartzo; B) bifásicas pseudo-secundárias hospedadas em cristal de quartzo; C) polifásica primária hospedada em cristal de quartzo; D) bifásicas primárias hospedadas em cristal de escapolita; E) trifásica primária hospedada em cristal de apatita, e F) grupo de IF bifásicas primárias hospedadas em cristal de calcita

Microtermometria A maioria das medições das temperaturas eutéticas (-80 a -35°C) em IF primárias e pseudo-secundárias permitiu caracterizar quimicamente três diferentes fluidos, os quais, considerando-se apenas os principais solutos, podem ser representados aproximadamente pelos sistemas a) $H_2O-NaCl-CaCl_2$, b) $H_2O-NaCl-CaCl_2-FeCl_2$ e c) $H_2O-NaCl-FeCl_2$. Poucas medidas registraram valores entre -23 e -20°C, denunciando também a presença de fluidos com NaCl e KCl. Valores abaixo de -60°C decorrem provavelmente da metaestabilidade, comum nos fluidos dos sistemas contendo $CaCl_2$.

As IF contidas em cristais de quartzo e de escapolita mostram temperaturas de homogeneização (T_{ht}) mais frequentes entre 150 e 250°C. Os fluidos aprisionados no quartzo revelam salinidades de 0,2 a 53,3% em peso equiv. de NaCl, enquanto aqueles aprisionados em escapolita registram salinidades de 5,2 a 37,4% em peso equiv. de NaCl. Ao contrário do quartzo, que apresenta fluidos correspondentes aos três sistemas, na escapolita foi identificado apenas o fluido a.

Nas IF hospedadas em cristais de apatita, as T_{ht} e salinidades mais frequentes cobrem, respectivamente, os intervalos de 200–275°C e 9–41% em peso equiv. de NaCl. Nesse mineral, foram identificados os três tipos de fluidos.

Na calcita, que marca o estágio mais tardio da alteração hidrotermal, as medições mais frequentes de T_{ht} variam de 125 a 175°C, e as de salinidades entre

2,2 e 23,2% em peso equiv. de NaCl. Apenas os fluidos a e b foram identificados nesse mineral.

As salinidades dos fluidos referentes às IF saturadas e caracterizados pelo sistema $H_2O-NaCl-CaCl_2$ foram estimadas, em termos dos principais solutos, em 15–26% de NaCl e 15–23% $CaCl_2$.

A Fig. 2 mostra, com base nas medidas das temperaturas de homogeneização, que o quartzo se precipitou durante toda a fase termal do sistema hidrotermal do Sossego, seguido de escapolita e apatita, enquanto que a calcita se formou a temperaturas mais baixas (< 200°C).

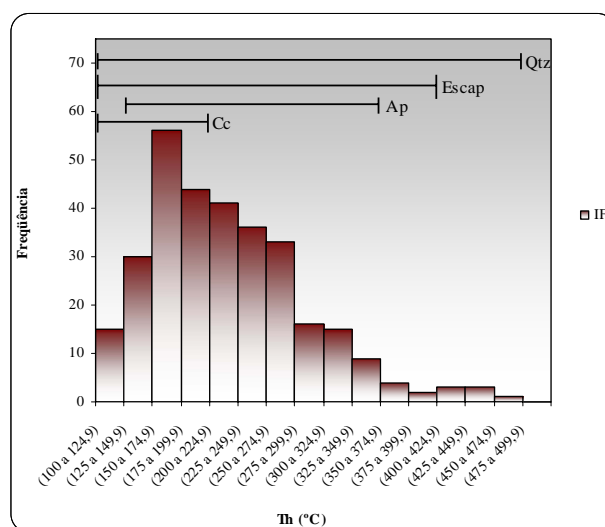


Figura 2. Histograma de frequência da Temperatura de homogeneização referente a todas IF estudadas

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES Uma possível interpretação para a evolução química e termal do paleossistema hidrotermal do Sossego considera como primários os fluidos **a** e **b**, ambos muito salinos e quentes.

O fluido **a** estaria relacionado aos processos de albitização, anfibolitização e escapolitização, enquanto que o **b** teria sido responsável pelo transporte de grandes quantidades de Fe que redundaram na formação dos magnetitos.

Mais tarde, esses dois fluidos teriam se misturado e gerado um fluido rico em Na, Ca e Fe, o qual responderia não só pelos processos de actinolitização, epidotização e cloritização das rochas, mas também pela mineralização.

Esses três fluidos teriam sido então diluídos, possivelmente devido à incorporação de água superficial ao sistema, no entanto mantiveram a temperatura sempre acima de 100°C (Fig. 3).

O estágio mais tardio representado pela carbonatação é consistente com as baixas temperaturas de homogeneização (100 a 180°C) das IF contidas na calcita. Estimativas da salinidade fornecem valores moderados a baixos (20 a 2 % em peso equiv. de NaCl), indicando uma diluição progressiva à medida que o sistema se resfriava.

Comparativamente aos outros depósitos Cu-Au de Carajás (Tabela 1), o depósito do Sossego apresenta semelhanças com os depósitos Águas Claras e Serra Verde, uma vez que nesses depósitos não foram identificados fluidos aquo-carbônicos. Por outro lado, todos os depósitos cupro-auríferos constantes da

tabela 1 têm relação com fluidos de alta salinidade e em todos o sistema $H_2O-NaCl-CaCl_2$ tem sido reconhecido. No mais, todos os depósitos são de idade arqueana, à exceção dos depósitos paleoproterozóicos de Breves e Gameleira.

A fonte dos fluidos primários para o Sossego pode ser atribuída à origem magmática ou metamórfica. No primeiro caso, os fluidos podem ter sido gerados a partir da colocação dos diversos corpos graníticos intrusivos na área. Por outro lado, o metassomatismo de Fe, a escapolitização, a albitização e salinidades muito elevadas, algumas > 50% em peso equiv. NaCl, favorecem, à falta de ebulição, uma fonte metamórfica. Dados de $\delta^{18}O$ para fluidos aprisionados em cristais em apatita e calcita do minério dos corpos Sossego e Sequeirinho mostram valores de +15,2‰ e +12,77‰, respectivamente (Monteiro *et al.* 2005, Neves *et al.* 2006), o que favorece essa origem, porquanto a composição encontrada é mais alta do que a esperada para água magmática.

De acordo com a literatura (Mora & Valley 1989, Hunt *et al.* 2005), seqüências evaporíticas ao sofrerem metamorfismo, geram fluidos altamente salinos e a formação de minerais ricos em Cl, dentre eles a escapolita. Mesmo não sendo observadas, essas seqüências são indicadas pelos elevados teores de Cl das rochas e pelo ubíquo metassomatismo sódico (albitização e escapolitização) a que elas foram submetidas. Esses processos bem como seus produtos são importantes evidências da atuação de fluidos metamórficos nas rochas.

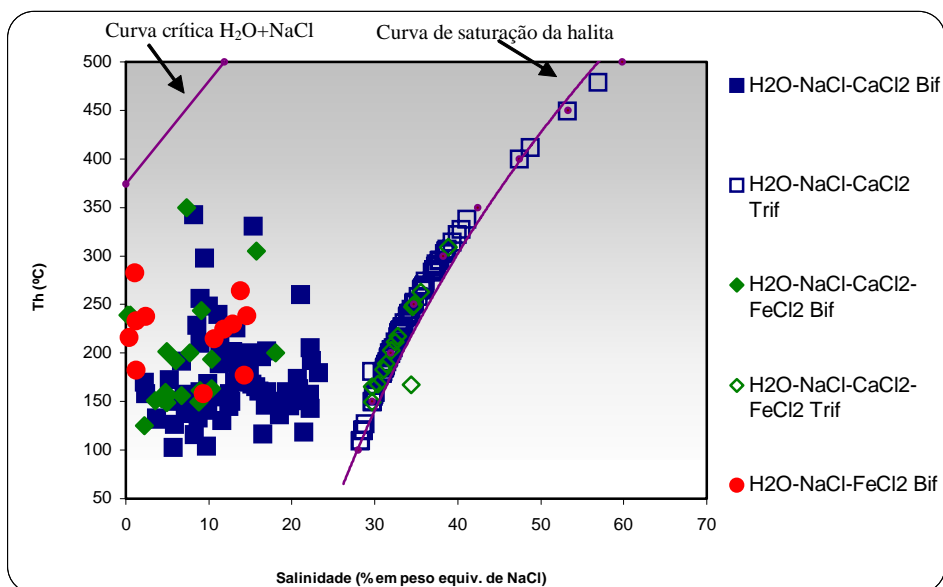


Figura 3. Diagrama Th_i versus salinidade que deixa evidente a diluição dos fluidos sob temperaturas que se mantiveram acima de 100°C



Depósitos	Fluidos Hidrotermais	Sistemas	Salinidade (% NaCl Equiv.)	Th (°C)	Fonte
Sossego	Aquosos salinos	NaCl-CaCl ₂ -H ₂ O NaCl-CaCl ₂ -FeCl ₂ -H ₂ O NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O	0,2-23 (bif) 28-57 (trif)	100-350 (bif) 100-480 (trif)	Este trabalho
Igarapé Salobo	Aquosos salinos e carbônicos	CO ₂ +CH ₄ NaCl-FeCl ₂ -CaCl ₂ -MgCl ₂ -H ₂ O	1,2-21,1 (bif) 34,9-52,1 (trif)	167-240 (bif) 226-485 (trif)	Réquia <i>et al.</i> 1995
Igarapé Bahia	Aquosos salinos e carbônicos	NaCl-CaCl ₂ -H ₂ O H ₂ O-CO ₂ CO ₂	5,4-23,8 (bif) 28,9-41,5 (trif)	100-236,3 (bif) 135,3-340,6 (trif)	Almada 1998
	Aquosos salinos, aquo-carbônica, carbônicos	NaCl-CaCl ₂ +H ₂ O NaCl-CaCl ₂ +H ₂ O+FeCl ₂ CO ₂	Fluido mineralizador: 5-45 Veios tardios: 10-25 (bif) 33-60 (trif)	Fluido mineralizador: 110-330 Veios tardios: 99-192 (bif) 174-519 (trif)	Dreher 2004; Dreher & Xavier, 2005
Águas Claras	Aquosos salinos	NaCl-CaCl ₂ -H ₂ O	0,53 - >23,5 (bif) 30-45 (trif)	102-387 (bif) 185-360 (trif)	Silva & Villas 1998
Breves	Aquosos salinos, carbônicos	NaCl-CaCl ₂ -H ₂ O NaCl-MgCl ₂ -H ₂ O NaCl-KCl-H ₂ O NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O CO ₂	0,2-26,2 (bif) 32-48,5 (trif)	195-316 (bif) 200-435 (trif)	Xavier <i>et al.</i> 2005
Gemeleira	Aquosos salinos e aquo-carbônicos	?	1-23 (bif) 30-40 (trif)	150-220 (bif) 170-400 (trif)	Ronchi <i>et al.</i> 2001
Serra Verde	Aquosos salinos	NaCl-CaCl ₂ -H ₂ O	0-23 (bif) 33-35 (trif)	150-230 (bif) 250-290 (trif)	Lima 2003

Tabela 1. Síntese das principais características dos fluidos hidrotermais dos depósitos Cu-Au de Carajás

Referências

- ALMADA M.C.O. 1998. *Estudo dos fluidos hidrotermais relacionados às "brechas" mineralizadas com sulfetos e ouro da área Bahia-Carajás*. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 100 p.
- DREHER A.M. 2004. *O depósito primário de Cu-Au de Igarapé Bahia, Carajás: rochas fragmentárias, fluidos mineralizantes e modelo metalogênico*. Tese de Doutorado, Universidade de Campinas, 86 p.
- DREHER A.M. & XAVIER R.P. 2005. The Igarapé Bahia deposit, Carajás: A Fe oxide (Cu-Au) hydrothermal system evolved in a submarine Archean setting. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, I SBM, Gramado. *Resumos*, CD-ROM.
- HUNT J., BAKER T., THORKELOSON D. 2005. Regional-scale Proterozoic IOCG-mineralized breccia systems: examples from the Wernecke Mountains, Yukon, Canada. *Mineralium Deposita*, **40**:492-514.
- LIMA L.F.O. 2003. *Os fluidos hidrotermais associados com a mineralização cupro-aurífera de Serra Verde, Província Mineral de Carajás*. Monografia, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará.
- MONTEIRO L.V.S., XAVIER R.P., JOHNSON C.A., HITZMAN M.W., CARVALHO E.R., & SOUZA FILHO C.R. 2005. The Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás mineral province, Brazil: stable isotope constraints on the genesis and hydrothermal system evolution. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 1, Gramado. *Resumo expandido*, CD-ROM, SBG.
- MORA C.I. & VALLEY J.W. 1989. Halogen-rich scapolite and biotite: implications for metamorphic fluid-rock interaction. *American Mineralogist* **74**:721-737.
- MORAIS R.P.S. & ALKMIM F.F. 2005. O controle litoestrutural da mineralização de cobre do Depósito Sequeirinho, Canaã dos Carajás, PA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 1, Gramado. *Resumo expandido*, CD-ROM, SBG.
- NEVES M.O., VILLAS R.N., MOURA C.V., GALARZA M.A., AIRES B., MAURITY C. 2006. Estudos isotópicos (Pb, C e O) no depósito Cu-Au do Sossego, Província Mineral de Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, IX, Belém. *Resumo expandido*, CD-ROM.
- RÉQUIA K.C.M., XAVIER R.P., FIGUEIREDO B. 1995. Evolução paragenética, textural e das fases fluidas no depósito polimetálico de Salobo, Província Mineral de Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências da Terra*, **7**:27-39.
- RONCHI L.H., LINDENMAYER Z.G., ARAÚJO J.C., BAECKER C.A. 2001. Assinatura granítica das inclusões fluidas relacionadas ao depósito de Cu-Au de Gemeleira, Carajás, PA. In: SIMP. de GEOL. da AMAZÔNIA, VII, *Resumos expandidos*. CD-ROM.
- SILVA C.M.G. & VILLAS R.N. 1998. The Águas Claras Cu-sulfide±Au Deposit, Carajás region, Pará, Brazil: geological setting, wallrock alteration and mineralizing fluids. *Rev. Bras. Geociências* **28**(3):315-326.
- VILLAS R.N., LIMA L.F.O., NEVES M.P., LAMARÃO C.N., FANTON J., MORAIS R. 2005. Relações entre deformação, alteração hidrotermal e mineralização no Depósito Cu-Au do Sossego, Província Mineral de Carajás. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 1, Gramado. *Resumo expandido*, CD-ROM, SBG.
- XAVIER R.P., ARAÚJO C.E.G., DREHER A.M., NUNES A.R., REGO J.L. 2005. Fluid evolution in the Paleoproterozoic intrusion-related Breves Cu-Au-(Mo-W-Bi-Sn) deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. In: *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Manaus, SBG. **4**:129-137.