

Introdução

Os principais depósitos de cobre de Carajás (Salobo, Cristalino, Sossego, Alvo 118, Igarapé Bahia/Alemão) são considerados de classe mundial e somam reservas medidas de aproximadamente de 2.000 Mt de minério bruto. No entanto, ainda restam várias questões não esclarecidas sobre a gênese desses depósitos.

As características distintivas reconhecidas nos depósitos IOCG de Carajás, tais como diferentes associações de alteração hidrotermal e de minerais de minério em cada um dos depósitos parecem refletir evolução dos sistemas hidrotermais em diferentes níveis crustais e a partir de distintas histórias de interação fluido-rocha e fluido-fluido.

A caracterização das zonas de alteração hidrotermal nos diferentes depósitos IOCG de Carajás é de fundamental importância para o reconhecimento de padrões de zoneamentos espaciais e temporais regionais de alteração nesses sistemas.

Metodologia

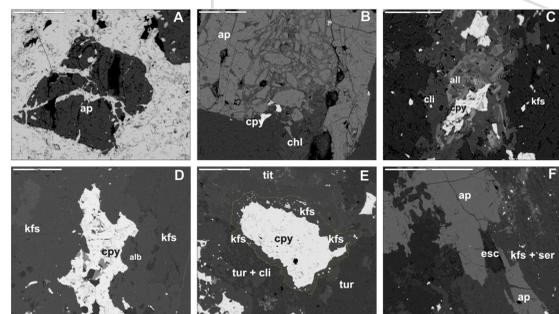
- (a) Revisão Bibliográfica
- (b) Estudos Petrográficos
- (c) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)
- (d) Análise comparativa entre os atributos dos depósitos Bacuri e Bacaba (Augusto et al., 2008).

Resultados

Rocha Hospedeira A rocha hospedeira típica apresenta cor cinza clara dominada por matriz fanerítica fina com **quartzo (> 50%)**, abundância de **feldspato potássico (30%)** em relação ao **plagioclásio (10 a 15%)**; **megacristais de quartzo (5 a 10%)** de até 0,5 cm subédricos a euédricos de forma bipiramidal hexagonal (apenas alguns poucos cristais), conferindo textura porfirítica à rocha, e cristais de biotita que ocorre principalmente nos interstícios da matriz, sendo mais concentrada em certas porções conferindo uma cor cinza escura a rocha. A rocha apresenta **foliação milonítica** definida principalmente pela orientação dos cristais de biotita e estiramento dos cristais de quartzo relacionados com extinção ondulante e formação de subgrãos nos cristais de quartzo.



Figura 1. Testemunho de sondagem com textura de rocha ígnea, pouco alterada (apenas alteração potássica por biotita fissural).



MEV Em geral, as análises realizadas por EDS permitiram caracterizar ao redor das concentrações de calcopirita, zonas com **enriquecimento em K**, representadas por uma geração tardia de **feldspato potássico limpido ao redor da calcopirita**, associado com um **enriquecimento em Na**. Ainda, identificou-se um grande enriquecimento de Ca nas zonas mineralizadas, denotado pelas fases minerais em **paragéneses com a calcopirita**, tais como a **apatita**, e os minerais do grupo do epidoto: **clinzoisita e allanita** (enriquecimento de elementos terras raras, tais como Ce e La). Foram identificados ainda fases minerais acessórias, tais como titanita e rutilo associadas principalmente com zonas de alteração potássica e cloritização; e monazita e galena associadas com apatita. Por fim, foi observada presença de **telureto de níquel** (melonita, NiTe₂) e **telureto de chumbo** (altaita, PbTe) como inclusões na calcopirita.

Figura 2. Imagens de elétrons retro-espalhados das amostras do Alvo Bacuri obtidas por microscópio eletrônico de varredura. (a) Cristal euédrico de apatita cortado por fraturas preenchidas por calcopirita. (b) Cristal de apatita brechado, preenchido por uma massa de clorita e calcopirita. (c) Cristais de calcopirita em meio à zona de alteração potássica com clinzoisita e allanita associadas. (d) Cristal subédrico de calcopirita em zona de alteração potássica com feldspato potássico e, subordinadamente, alteração sódica com albita. (e) Calcopirita envolvida por uma borda de cristais limpidos de feldspato potássico em meio a uma massa de turmalina e clinzoisita. (f) Calcopirita em paragéneses mineral com apatita, sendo alterada por escapolita e feldspato potássico.

Alteração Hidrotermal

(i) Alteração Sódica (albitização) Estágio inicial de alteração hidrotermal do Alvo Bacuri, dado por uma coloração branca a rósea em amostras de testemunhos. Os cristais hidrotermais de albita encontram-se dispersos na matriz da rocha diferenciando-se dos cristais ígneos pela textura tabuleiro de xadrez (*chess board*).

(ii) Silicificação Representada por cristais de quartzo subédricos de até 1 cm, tanto disseminados como confinados em veios (mais comum), fortemente deformados.

(iii) Alteração Potássica (com biotita) De forma geral, a biotita encontra-se disseminada pela rocha ocorrendo em cristais finos, muitas vezes distribuídos paralelamente à foliação, e tem suas maiores concentrações onde ainda há pouca alteração hidrotermal desenvolvida.

(iv) Alteração Potássica (com feldspato potássico) Feldspato potássico ocorre disseminado na rocha hospedeira substituindo os cristais de feldspato ígneos, formando grandes cristais de cerca de 0,5 cm, com um aspecto sujo em luz natural. Uma segunda geração de feldspato potássico é encontrada em borda de aproximadamente 0,1 mm, mostrando uma textura muito limpa.

(v) Escapolitização Ocorre somente de forma fissural cortando produtos de estágios de alteração hidrotermal anteriores, como a alteração potássica.

(vi) Cloritização e Epidotização Concede uma coloração de tons de verde à hospedeira subvulcânica félsica, dependendo da quantidade de clorita. Encontram-se cristais subédricos finos a médios de clorita tanto em vênulas e veios como disseminado pela rocha. A epidotização está relacionada com a intensa cloritização, sendo encontrados cristais de allanita e clinzoisita disseminados na rocha juntamente com cristais de clorita e de feldspato potássico.

(vii) Formação de magnetita A primeira geração é relacionada com as alterações iniciais, tais como alteração potássica e alteração sódica, estando disseminada pela rocha e sendo concordante com a foliação. A segunda geração de magnetita associa-se com a mineralização, sendo encontrada em veios e vênulas juntamente com clorita e allanita associadas a calcopirita.

(viii) Mineralização Relacionada com alteração potássica e cloritização sendo acompanhada por apatita, monazita, epidoto, allanita, clinzoisita, feldspato potássico, pirita e magnetita. Pode ocorrer também associada a veios de quartzo preenchendo os interstícios dos cristais de quartzo, onde as concentrações de calcopirita são bem maiores. Melonita (NiTe₂) e altaita (PbTe), galena e cheralita [CaTh(PO₄)₂] são fases minerais acessórias.

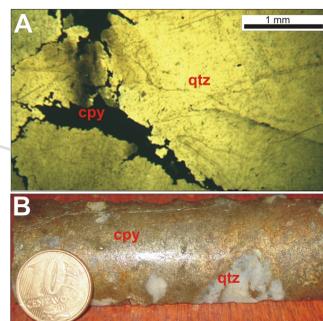


Figura 3. (a) Fotomicrografia em luz natural mostrando cristais de quartzo maiores que 3 mm sendo cortados por uma massa de cristais de calcopirita (opaco). (b) Testemunho de sondagem mostrando a predominância de cristais de calcopirita junto a cristais de quartzo, uma das formas de ocorrência do minério.

(ix) Carbonatização Estágio de alteração tardio no qual cristais de calcita anédrica ocorrem disseminados na rocha, porém em pequena quantidade, ou em vênulas de cerca de 2 mm que cortam minerais formados em estágios de alteração anteriores.

(x) Alteração Hidrolítica Corresponde ao estágio de alteração hidrotermal tardio do Alvo Bacuri. É representada pela presença abundante de cristais de sericita alterando feldspato potássico e mais subordinadamente albita. Associa-se também a cristais grossos de muscovita que ocorrem principalmente em zonas de silicificação

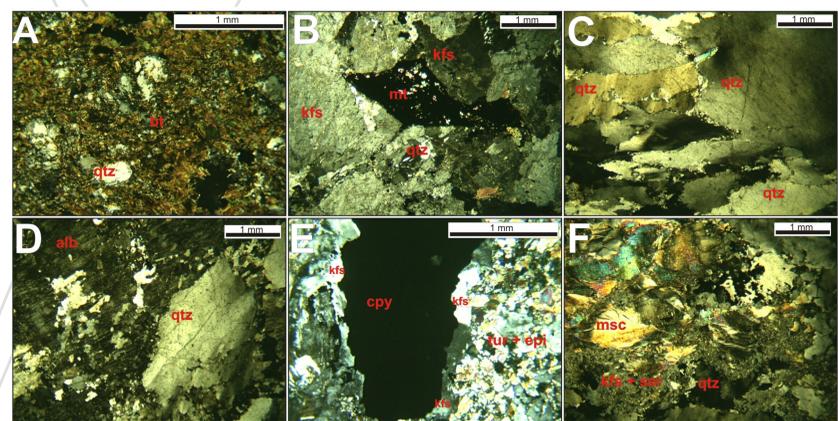


Figura 4. (a) Alteração potássica com biotita ocupando os interstícios entre megacristais ígneos de quartzo. (b) Cristais de feldspato potássico em paragéneses com magnetita, ambos deformados. (c) Silicificação apresentando quartzo estirado com extinção ondulante e formação de subgrãos. (d) Alteração sódica representada por cristais de albita com textura tabuleiro de xadrez. (e) Calcopirita em paragéneses com cristais de feldspato potássico limpidos ocorrendo como uma borda na calcopirita. (f) Cristais de feldspato fortemente alterados por sericita; formação de cristais grossos de muscovita deformados, como evidenciado por pink bands.

Discussão

Intensa alteração potássica, cloritização e silicificação são as alterações hidrotermais mais proeminentes características deste depósito, associadas a zona de cisalhamento.

- **1º estágio:** alteração sódica com formação de albita, contemporâneo a um primeiro estágio de silicificação;
- **2º estágio:** alteração potássica, cristalização de feldspato potássico e biotita, juntamente com primeira geração de magnetita. Cristais de biotita concordante a foliação; cristais de feldspato potássico substituem cristais de albita;
- **3º estágio:** escapolitização fissural, indicador de um fluido (mineralizante) com alta salinidade, o que teria facilitado o transporte de metais a partir de complexos cloretados;
- **4º estágio:** cloritização ocorre inicialmente de forma seletiva (substitui biotita) e fissural, em vênulas, e quando bem desenvolvida, ocorre de forma pervasiva pela rocha, juntamente com apatita, allanita, epidoto, monazita e uma segunda geração de magnetita;
- **Mineralização:** mineralização ocorre em paragéneses aos minerais do 4º estágio sendo representada pela calcopirita. Ocorre principalmente em veios e vênulas relacionados à intensa alteração por feldspato potássico e cloritização ao longo da foliação da rocha. A mineralização ocorre também confinada em veios nos interstícios dos cristais hidrotermais de quartzo (2ª geração);
- **5º estágio:** estágio tardio, representados por intensa alteração hidrolítica (sericitização do feldspato potássico) e por carbonatização fissural.

Mineral	Alteração	Alteração						
		Alteração Sódica	Silicificação	Alteração Potássica	Escapolitização	Cloritização	Mineralização	Alteração Hidrolítica
Quartzo			██████████	██████████				
Albita		██████████						
Feldspato Potássico				██████████				
Biotita				██████████				
Rutilo				██████████				
Titanita				██████████				
Apatita						██████████		
Turmalina				██████████				
Clorita					██████████			
Sericita							██████████	
Muscovita								██████████
Alanita						██████████		
Epidoto						██████████		
Calcita								██████████
Magnetita				██████████				
Calcopirita				██████████				
Pirita							██████████	
Galena								██████████
Monazita								██████████

Evolução Paragenética do Sistema Hidrotermal do Alvo Bacuri

Figura 5. Tabela representativa da evolução paragenética do Sistema Hidrotermal do Alvo Bacuri.

A evolução paragenética do sistema hidrotermal do **Alvo Bacuri** é muito semelhante à do **Alvo Bacaba**. Estudos realizados anteriormente por Augusto *et al.*, (2008), permitiram o reconhecimento das rochas hospedeiras no **Alvo Bacaba**, como sendo representadas principalmente por **granito e gabro**, o que difere esse alvo do **Alvo Bacuri**, que seria hospedado predominantemente por rocha **subvulcânica ácida**.

Destacam-se como diferenças, a **escapolitização mais intensa no Alvo Bacaba**, e **silicificação e sericitização** (com formação de muscovita grossa) mais expressivas no **Alvo Bacuri**. Zonas com alteração potássica com biotita e turmalina foram descritas nos dois depósitos. Assim como no Alvo Bacuri, a mineralização de cobre no Alvo Bacaba teria sido tardia durante o desenvolvimento do sistema hidrotermal, sendo espacialmente associada a zonas com alteração potássica contendo feldspato potássico. A associação de minerais de minério também seria semelhante, destacando-se a presença de **magnetita juntamente com a calcopirita**, além da ocorrência comum de **galena, melonita, altaita, allanita, apatita, monazita e cheralita** nas zonas mineralizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Augusto R.A., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Souza Filho C.R. 2008. Zonas de Alteração hidrotermal e paragéneses do minério cuprífero do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás. Revista Brasileira de Geociências, 38(2): 263-277.
- Hitzman M.W. 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when, and why. In: Porter TM (ed) Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective. Austral Miner Fund, Adelaide, pp 9-25.
- Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Hitzman M.W., Carvalho E.R., Johnson C.A., Souza Filho C.R., Torresi I. 2008a. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide copper gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. Mineralium Deposita, 43: 129-159.
- Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Hitzman M.W., Juliani C., Souza Filho, C.R., Carvalho E.R. 2008b. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. Ore Geology Reviews, 34:317-336.
- Pestilho A.L.S. 2008. Depósito de Cu-(Zn-Ni) do Alvo Castanha, Província Mineral de Carajás, PA: Evolução Paragenética e dos Fluidos Mineralizantes. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 85p.
- Williams P.J., Barton M.B., Johnson D.A., Fontboté L., Haller A., Mark G., Oliver N.H., Marschik R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. Economic Geology 100 th Anniversary Volume, p.371-405.