

DEPÓSITOS DE ÓXIDO DE FERRO-COBRE-OURO DA PROVÍNCIA CARAJÁS: EVOLUÇÃO E SOBREPOSIÇÃO DE EVENTOS ARQUEANOS E PALEOPROTEROZOICOS

Lena V. S. Monteiro¹ ([lena.v.silva@usp.br](mailto:lenav.silva@usp.br)), Carolina P. N. Moreto² (carolina.moreto@ige.unicamp.br),
Roberto P. Xavier² (xavier@ige.unicamp.br), André L.S. Pestilho² (andreppestilho@gmail.com), Gustavo H. C.
Melo² (gustavodemelo@ige.unicamp.br), Caetano Juliani¹ (cjuliani@usp.br), Marco A.S. Delinardo²
(marcodelinardo@gmail.com), Érika S.B. Santiago² (esbsantiago@gmail.com)

¹ Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP

² Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP

INTRODUÇÃO

A Província Carajás apresenta a maior concentração conhecida de depósitos de cobre-(ouro) de alta tonelagem caracterizados por elevado conteúdo de magnetita-(hematita) e por sua associação com extensas zonas de alteração hidrotermal. Tais depósitos, que incluem Salobo, Igarapé Bahia/Alemão, Sossego, Cristalino, Alvo 118, além de vários outros em avaliação (Polo, Furnas, Visconde, Bacaba, Castanha, Bacuri, Jatobá) têm sido atribuídos a classe dos *iron oxide-copper-gold (IOCG) deposits* (Huhn & Nascimento, 1997, Réquia *et al.*, 2003, Tallarico *et al.*, 2005, Monteiro *et al.*, 2008, Xavier *et al.*, 2012).

Os depósitos IOCG de Carajás compartilham evolução paragenética semelhante, com alteração sódica inicial (albita-escapolita), seguida por estágios de alteração sódica-cálcica (albita-actinolita) e potássica (biotita-ortoclásio), em geral sincrônica à mineralização. Esses depósitos também refletem evolução fluidal similar, com predominância de fluidos hipersalinos e quentes (> 500 °C) nos estágios iniciais e mistura progressiva com fluidos diluídos e frios em estágios tardios (Monteiro *et al.*, 2008, Xavier *et al.*, 2012).

A associação de todos esses depósitos com distintas porções de extensos sistemas hidrotermais regionais, contudo, é dificultada, uma vez que dados geocronológicos precisos não suportam a sincronicidade dos eventos mineralizantes nesses depósitos. Na parte norte do Domínio Carajás, um importante evento metalogenético em ca. 2,57 Ga foi caracterizado nos depósitos de Salobo e Igarapé Bahia (Réquia *et al.*, 2003; Tallarico *et al.*, 2005). Entretanto, estudos geocronológicos realizados por Moreto *et al.* (2013) nos depósitos do Cinturão Sul do Cobre não permitem associar todos os depósitos IOCG de Carajás a um único evento neoarqueno. Esses estudos revelam a importância de eventos múltiplos entre 2,71 Ga e 2,68 Ga associados à formação dos corpos Sequeirinho-Pista da Mina Sossego e dos depósitos Bacuri, Bacaba e, possivelmente, Castanha. Adicionalmente, eventos hidrotermais paleoproterozoicos foram também registrados no depósito Bacaba (ca. 2,05 Ga) e nos corpos Sossego-Currall (Mina Sossego) em ca. 1,90 a 1,87 Ga, em concordância com a idade atribuída à mineralização do depósito Alvo 118 (ca. 1,88 Ga; Tallarico 2004).

A compreensão da natureza dos múltiplos eventos de formação de depósitos IOCG no contexto da evolução tectônica da Província Carajás, assim como o reconhecimento dos efeitos da sobreposição desses eventos, representam novos desafios. A integração e reinterpretação do conjunto de dados litoquímicos e isotópicos dos depósitos IOCG de Carajás, a luz dos novos dados geocronológicos, contudo, possibilita a reconstituição da história evolutiva desses depósitos.

RESULTADOS

Os depósitos IOCG do Cinturão Sul do Cobre são hospedados por unidades mesoarqueanas de ca. 3,0 Ga (Granito Sequeirinho e Tonalito Bacaba), ca. 2,97 Ga (rochas metavulcânicas félscicas com lentes de rochas metaultramáficas) e ca. 2,84 Ga (Granito Serra Dourada) e neoarquenas, incluindo o Granito Granofírico Sossego, o Pórfiro Castanha e corpos de gabros e gabronoritos de ca. 2,74 Ga (U-Pb SHRIMP em zircão; Moreto *et al.*, 2013).

Os dados litoquímicos dos depósitos IOCG indicam que a assinatura geoquímica do minério nos depósitos arqueanos apresenta forte herança de suas rochas hospedeiras, principalmente quando considerados os conteúdos de $(Nb^{*}10)-(TiO_2^{*}100)-Zr$ (Figura 1). Como exemplo, os conteúdos de Nb-Ti-Zr do minério do Corpo Sequeirinho são semelhantes aos dos gabros e gabronoritos, enquanto a assinatura do minério do depósito Castanha é análoga a do Pórfiro Castanha que o hospeda. As amostras de minério dos depósitos paleoproterozoicos (Alvo 118 e Corpo Sossego), entretanto, apresentam

assinatura geoquímica distinta de todas as rochas hospedeiras identificadas na área dos depósitos, especialmente devido aos conteúdos mais elevados de Nb do minério. No depósito Bacaba, no qual sobreposição de evento hidrotermal paleoproterozoico foi identificada, as amostras de minério mostram composição intermediária entre a de suas rochas hospedeiras, tais como o Tonalito Bacaba e o Granito Serra Dourada, mesoarqueanos, e aquela do minério dos depósitos IOCG paleoproterozoicos.

Amostras de minério dos depósitos arqueanos (Sequeirinho e Castanha) também apresentam os conteúdos mais elevados de Ni+Co, enquanto o minério do Alvo 118 tem maiores conteúdos de Sn, W, Be, Bi e Y. Tanto o minério do Corpo Sossego como do depósito Bacaba apresentam composições intermediárias desses elementos. Razões entre ouro e urâno definem campos compostionais distintos separando os depósitos arqueanos daqueles que formaram-se ou registraram sobreposição de eventos paleoproterozoicos, devido aos conteúdos mais elevados de ouro nos últimos.

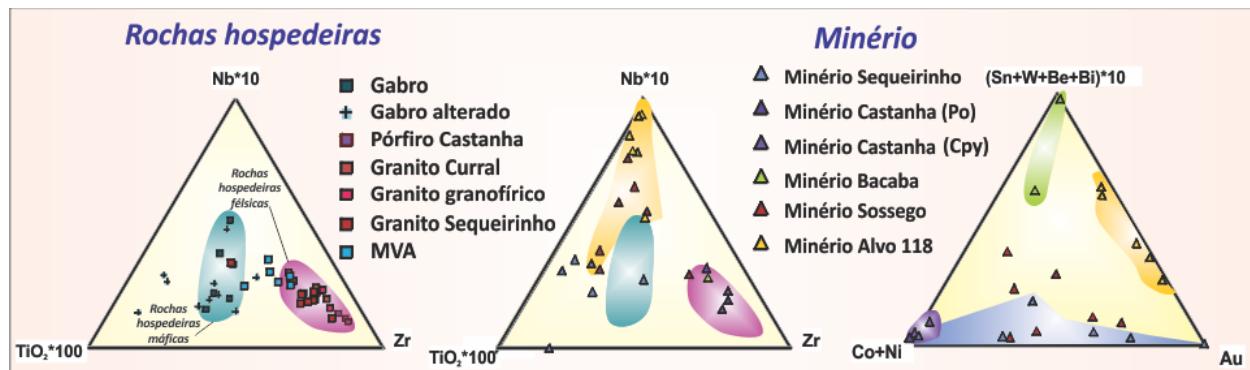


Figura 1. Diagramas ternários para rochas hospedeiras e amostras de minério dos depósitos IOCG Sossego, Castanha, Bacaba e Alvo 118.

Nos depósitos IOCG arqueanos, assinatura predominantemente magmática para os fluidos hidrotermais ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}} = 6,0$ a $7,8\text{\textperthousand}$ a 550°C) e para a fonte de enxofre ($\delta^{34}\text{S}_{\text{cpy}} = 0,9$ a $3,5\text{\textperthousand}$) é característica do minério de Cu-Ni-Zn com predominância de pirrotita-pentlandita em associação com corpos de magnetititos do depósito Castanha (Pestilho, 2011). O minério do Corpo Sequeirinho foi formado por processos de mistura envolvendo fluidos magnéticos e externamente derivados, possivelmente marinhos ou meteóricos de baixa latitude, durante a exumação progressiva do sistema (Figura 2).

Eventos de sobreposição paleoproterozoicos no depósito Bacaba, arqueano, são também revelados pelas composições isotópicas da calcopirita ($\delta^{34}\text{S}_{\text{cpy}} = 1,3\text{\textperthousand}$ a $5,4\text{\textperthousand}$) e dos fluidos hidrotermais ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}} = 5$ a 2\textperthousand ; $\delta\text{D}_{\text{fluido}} = -50$ a $-10\text{\textperthousand}$ a 400°C), que apontam para contribuição de enxofre proveniente de redução termoquímica de sulfatos e participação significativa de água do mar (Figura 2) para o paleossistema hidrotermal (Pestilho, 2011).

Nos depósitos IOCG paleoproterozoicos a contribuição de fluidos superficiais (300 a $< 250^\circ\text{C}$; salinidade $< 10\%$ equiv. NaCl e $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluido}} = -0,4$ a $-5,2\text{\textperthousand}$ a 300°C ; Monteiro *et al.*, 2008; Torresi *et al.*, 2012) foi importante para a mineralização de cobre-ouro no depósito Alvo 118 e no Corpo Sossego. Nesses depósitos, formados em níveis crustais mais rasos, os valores mais elevados de $\delta^{34}\text{S}_{\text{cpy}} (> 7,5\text{\textperthousand})$ também sugerem contribuição de sulfatos e de fluidos meteóricos (Figura 2), possivelmente vinculados aos paleoquíferos associados à Formação Águas Claras.

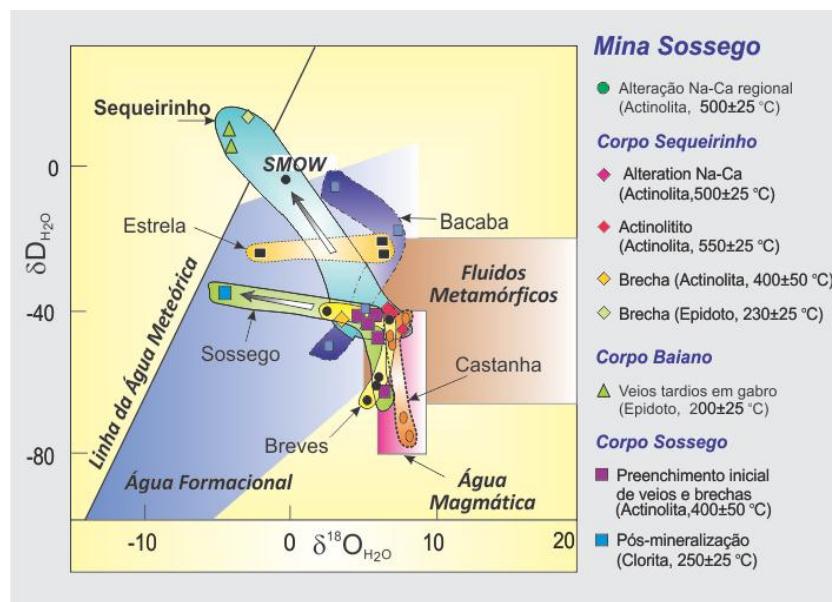


Figura 2. Composição isotópica de oxigênio e hidrogênio do fluido hidrotermal em equilíbrio com minerais hidrotermais de depósitos cupro-auríferos de Carajás. Fonte dos dados: Sossego (Monteiro *et al.*, 2008a); Bacaba e Castanha (Pestilho, 2011), Estrela (Lindenmayer *et al.*, 2005) e Breves (Botelho *et al.*, 2005).

CONCLUSÕES

A integração dos dados de isótopos estáveis indicam que os sistemas hidrotermais IOCG arqueanos (ca. 2,71 Ga a 2,68 Ga) foram híbridos e suas distintas porções revelam variável contribuição de fluidos magmáticos e externamente derivados. Assinaturas magnáticas são reconhecidas notadamente nos depósitos IOCG arqueanos com predominância de corpos de magnetititos com apatita (Castanha e Corpo Sequeirinho). Possivelmente essa assinatura reflete herança a partir de mecanismos de interação fluido-rocha envolvendo rochas hospedeiras reativas ricas em Fe^{2+} ou feldspato, principalmente relacionadas ao magmatismo bimodal de ca. 2,74 Ga, tais como os gabronoritos e rochas intrusivas felsicas de coloção rasa (Granito Granofílico Sossego e Pórfiro Castanha).

A assinatura química dos depósitos IOCG paleoproterozoicos indica afinidade com fluidos derivados de magmas graníticos reduzidos, alcalinos a subalcalinos, com maiores conteúdos de Nb, Sn, W, Be e Bi, embora tais rochas não sejam reconhecidas nas zonas mineralizadas. Tais dados sugerem mecanismos de interação dos fluidos hidrotermais com os granitos tipo A de ca. 1,88 Ga, ao longo da intersecção de falhas NE e NW com importantes descontinuidade translisosféricas arqueanas reativadas de direção aproximada E-W. Mistura com fluidos meteóricos favoreceram a deposição do minério, de modo análogo ao verificado em outros depósitos cupro-auríferos paleoproterozoicos, como Breves (Botelho *et al.*, 2005).

Sobreposição de eventos hidrotermais paleoproterozoicos em depósitos IOCG arqueanos, como no depósito Bacaba, resultam em assinaturas químicas e isotópicas intermediárias entre os depósitos arqueanos e paleoproterozoicos, o que se reflete na participação de água do mar e fontes oxidadas de enxofre (sulfatos) nos paleossistemas hidrotermais, condizentes com a evolução da composição química dos oceanos apenas após o Grande Evento de Oxidação.

Conjuntamente os dados litoquímicos e isotópicos permitem a identificação de: (i) grande diversidade de depósitos IOCG arqueanos em função de mecanismos de interação fluido-rocha ao longo dos corredores estruturais importantes e variável participação de fluidos com assinatura magnética e marinha, (ii) sobreposição de eventos hidrotermais arqueanos e paleoproterozoicos possivelmente refletindo a evolução tectônica do Domínio Bacajá em ca. 2,05 Ga, e (iii) a instalação de novos sistemas hidrotermais no Paleoproterozoico com herança tanto dos depósitos IOCG arqueanos preexistentes como do magmatismo tipo A de ca. 1,88 Ga.

AGRADECIMENTOS: Agradecimentos especiais são devidos à VALE, em especial a Márcio Godoy, Benevides Aires e Cleive Ribeiro. Essa pesquisa foi financiada com recursos de Projetos de Auxílio à Pesquisa CNPq (555065/2006-5, 472549/2009-0 e 303359/2008-0) e com apoio do INCT GEOCIAM (CNPq/ MCT/ FAPESPA 573733/ 2008-2) e ICAAF 053/2011 Convênio VALE/FAPESPA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Botelho, N.F., Moura, M.A., Teixeira, L.M., Olivo, G.R., Cunha, L.M., Santana, M.U. 2005. Caracterização Geológica e Metalogenética do Depósito de Cu (Au, W, Mo, e Sn) Breves, Carajás. In: O.J. Marini, E.T. Queiroz, B.W. Ramos. (Org.). Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, p. 339-389.
- Huhn, S.R.B., Nascimento, J.A.S. 1997. São os depósitos cupríferos de Carajás do tipo Cu-Au-U-ETR? In: Costa, M.L., Angélica, R.S. (Coord.). Contribuições à geologia da Amazônia. Belém, SBG–Núcleo Norte, v. 1, p. 143-160.
- Lindenmayer, Z.G., Fleck, A., Gomes, C.H., Santos, A.B.S., Caron, R., Paula, F. de C., Laux, J.H., Pimentel, M.M., Sardinha, A.S. 2005. Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará. In: O.J. Marini, B.W. Ramos, E.T. Queiroz. (Orgs.). Caracterização de Depósitos Minerais de Distritos Mineiros da Amazônia. Brasília. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, p. 137-205.
- Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Carvalho E.R., Hitzman M.W., 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.
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Melo, G.H.C., Silva, M.A.D. 2013. Multiple hydrothermal and iron oxide Cu-Au systems in the Southern Copper Belt, Carajás Province. In: Simpósio Brasileiro de Metalogenia, 3, Anais, Gramado, RS [CDROM]
- Pestilho A.L.S. 2011. Sistemática de isótopos estáveis aplicada à caracterização da evolução dos paleo-sistemas hidrotermais associados aos depósitos cupríferos Alvo Bacaba e Alvo Castanha, Província Mineral de Carajás, PA. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 71 p
- Réquia, K., Stein, H., Fontboté, L., and Chiaradia, M., 2003. Re-Os and Pb-Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. *Mineralium Deposita*, 38, 727-738.
- Tallarico, F.H.B., Figueiredo, B.R., Groves, D.I., Kositsin, N., McNaughton, N.J., Fletcher I.R., and Rego J.L., 2005. Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: an Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. *Economic Geology*, 100, 7-28.
- Torresi I., Bortholoto, D.F.A., Xavier R.P., Monteiro L.V.S. 2012. Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope systematics of the Alvo 118 iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province (Brazil): implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 47, 299-323.
- Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S., Moreto, C.P.N., Pestilho, A.L.S., Melo, G.H.C., Silva, M.A.D., Aires, B., Ribeiro, C., and Silva, F.H.F., 2012. The Iron Oxide Copper-Gold Systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. In: *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: a Tribute To Richard Sillitoe*. Special Publication of the Society of Economic Geologists.