

## ESTUDO PETROGRÁFICO E LITOGEOQUÍMICO DAS ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E MINERALIZAÇÃO DO DEPÓSITO CUPRÍFERO HADES, DOMÍNIO CARAJÁS, PARÁ

Helena Martinho Coradini<sup>1</sup>, Carolina Penteadó Natividade Moreto<sup>2</sup>, Thais Caroline Murer<sup>3</sup>

1. Geóloga pelo Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (IG-UNICAMP)
2. Professora-pesquisadora do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (IG-UNICAMP), Departamento de Geologia e Recursos Naturais (*orientadora*)
3. Mestra em Geociências pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

### Resumo

Estudou-se o depósito cuprífero Hades, SW do Domínio Carajás, a partir de petrografia e litogeoquímica de rocha total das zonas de alteração hidrotermal e mineralização. Diferenciaram-se dois eventos de mineralização com calcopirita em estilos distintos (brecha e vênulas) e as zonas de alteração hidrotermal: albitização, alteração propilítica, silicificação associada ao minério de alto teor em brecha e formação de veios com actinolita+epidoto+halo de albita, mineralizados ou não. Análises litogeoquímicas e cálculos de balanço de massa mostraram adição de metais pelos fluidos mineralizantes (Fe-Cu-Cr-Zn-Sr-Y-Nb) e, devido à alta razão fluido-rocha, mobilidade de elementos tidos como imóveis em sistemas hidrotermais (Ti-Nb-Zr-Sm-Y). A assinatura geoquímica do minério em brecha tem enriquecimento em Cu-Fe-Mg-Ca-P-Zn-Cr-Ni-Co e baixo Al-K-Na-Ti-Rb-Ba-Sr-Zr-V. O enriquecimento em Ni-Cr-Co sugere participação de fluidos hidrotermais que interagiram com rochas máfica-ultramáficas regionais.

**Palavras-chave:** Província Carajás; depósito cuprífero; litogeoquímica;

**Apoio financeiro:** CNPq (bolsa de iniciação científica 119256/2018-5) e FAPESP (projeto 2016/13162-7).

**Trabalho selecionado para a JNIC:** Pró-Reitoria de Pesquisa da UNICAMP

### Introdução

O Domínio Carajás é reconhecido pelo potencial metalogenético e registra sobreposição de múltiplos eventos hidrotermais associados a mineralizações cupríferas que ocorreram no Neoarqueano (2,70 Ga e 2,56 Ga) e no Paleoproterozoico (1,88 Ga), durante reativação regional de zonas de cisalhamento (Moreto et al., 2015a,b; Xavier et al., 2017). Destacam-se dois grupos de depósitos cupríferos de classe mundial, com pervasiva alteração hidrotermal regional: Cu-Au relacionados à granitos e tipo óxido de ferro-cobre-ouro (iron oxide-copper-gold, IOCG; Xavier et al., 2017). O depósito cuprífero Hades, no extremo sudoeste do Domínio Carajás, carece de informações geológicas detalhadas e integradas, inclusive com ausência de dados geoquímicos na literatura, dificultando a compreensão de sua evolução metalogenética. É necessário contextualizá-lo no quadro geológico-regional.

Para isso, este trabalho caracterizou as zonas de alteração hidrotermal e mineralizações de cobre, utilizando-se de petrografia das assembleias minerais e geoquímica de rocha total. Por meio de petrografia em luz refletida e transmitida, identificaram-se as associações minerais da alteração hidrotermal e da zona mineralizada dos diferentes litotipos. As análises litogeoquímicas apontaram a assinatura geoquímica da mineralização cuprífera (enriquecimento em Cu-Fe-Mg-Ca-P-Zn-Cr-Ni-Co e baixo conteúdo de Al-K-Na-Ti-Rb-Ba-Sr-Zr-V) e permitiram investigar a mobilidade de metais no sistema, por exemplo, confirmando a mobilidade de elementos geralmente considerados como imóveis em sistemas hidrotermais (e.g. Ti, Nb, Zr, Sm e Y). Os resultados, tratados com diagramas e cálculos de balanço de massa, assinalaram quais constituintes foram incorporados e quais foram perdidos com a evolução do sistema hidrotermal, refletindo em mudanças composicionais de enriquecimento e empobrecimento relativos associadas com as interações fluido-rocha.

Desta forma, este trabalho visa auxiliar na reconstituição do sistema cuprífero do depósito Hades, integrando-se ao panorama geral que está sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa em metalogênese do Instituto de Geociências (IG).

### Metodologia

As amostragens de rochas foram a partir de testemunhos de sondagem disponibilizados pela VALE S/A. Foram amostradas desde a rocha granítica hospedeira de minério mais preservada, abrangendo diferentes estágios e intensidades de alteração, de incipiente a pervasiva, por fim, contemplando o minério principal. Derivaram-se 13 amostras para a petrografia e 15 para as análises geoquímicas de rocha total. Fez-se descrição petrográficas das 13 lâminas delgada-polidas em luz refletida e transmitida, com identificação das associações minerais dos tipos de alteração hidrotermal e de minério.

A preparação física das amostras e as análises litogeoquímicas foram realizadas no Laboratório de Geoquímica do IG. Foi utilizado o método de Fluorescência de Raios X (FRX) na determinação e quantificação dos componentes químicos (15 amostras). Amostras sulfetadas tiveram alguns constituintes elementares

analisados por Espectrômetro de Emissão com Plasma Indutivamente Acoplado (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, Q-ICP-MS), primordialmente elementos traço e elementos terras raras (ETR) de interesse.

O software "GCDKit" foi utilizado no tratamento dos dados geoquímicos: confecção de diagramas e aplicação gráfica do balanço de massa. Utilizou-se o método das isóconas (isocon, onde iso=igual/constante, con=concentração) de Gresens (1967), cuja equação principal foi adaptada para ser apresentada graficamente por Grant (1986). Assim, identificando elementos relativamente imóveis no sistema (estes que definem retas isóconas), investigam-se enriquecimentos e empobrecimentos relativos de constituintes químicos.

### Resultados e Discussão

Diferenciaram-se quatro zonas de alteração que compõem o sistema hidrotermal do depósito Hades: i) albitização, por vezes com preservação da textura ígnea original da rocha granítica hospedeira. Há substituição dos feldspatos ígneos (*fsp*) por albita hidrotermal (*ab*), conferindo cor rósea à zona; ii) alteração propilitica com clorita (*chl*) + epidoto (*ep*) ± calcita (*cal*), sob a forma de *fronts* de alteração ou como vênulas e veios, conferindo cor verde escura a preta para a rocha; iii) silicificação associada à mineralização de alto teor em brecha, com calcopirita (*cpy*) como sulfeto principal e subordinadamente epidoto ± calcita ± pirita (*py*); iv) formação de veios e vênulas, com actinolita (*act*) + epidoto + clorita ± calcita, com halo de alteração com albita, que podem estar ou não mineralizados (calcopirita ± pirita).

Há dois eventos de mineralização, ambos com calcopirita como o principal mineral de minério e pirita subordinadamente: a) minério em brecha (Fig. 1) envelopado por silicificação e propilitização; b) minério venular (Fig. 2) ocorrendo em veios e vênulas com actinolita grossa, epidoto e halo de albita.

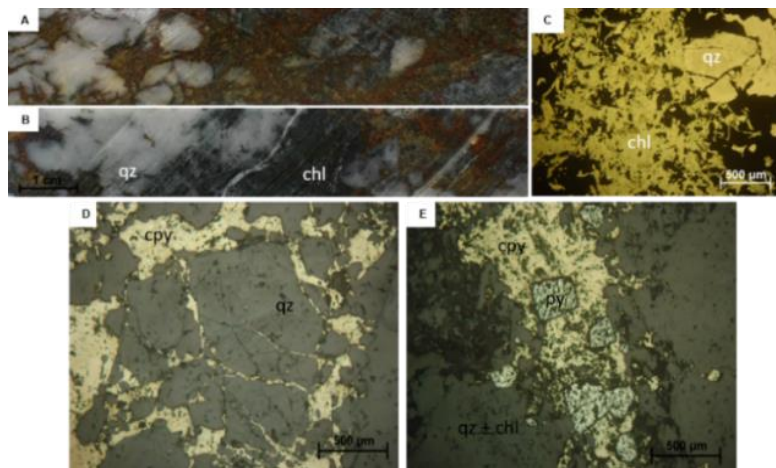


Fig. 1. Minério em brecha envelopado por silicificação e propilitização. Infiltrações de calcopirita (*cpy*) em quartzo (*qz*) (D) e cristais idiomórficos de pirita (*py*) (E).

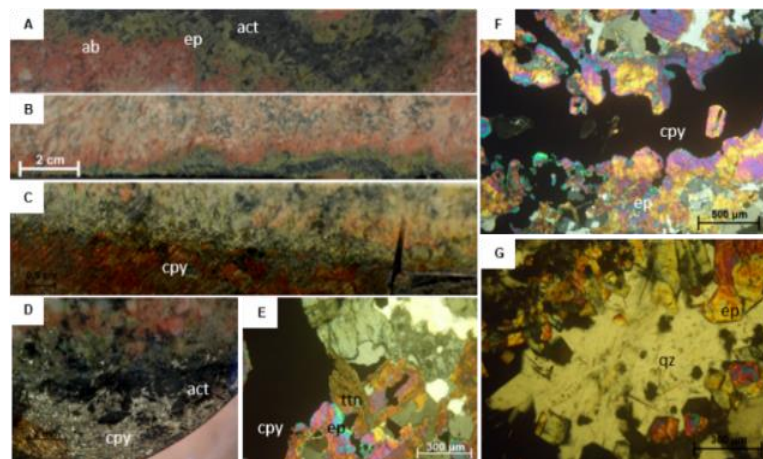


Fig. 2. Mineralização em veios e vênulas de *act-ep-cpy* (actinolita-epidoto-calcopirita) com halo de albita (*ab*). E, F e G: Destaque para epidoto granular e cristais aciculares de actinolita.

Análises litogeoquímicas (Figs. 3 e 4) revelaram uma pequena tendência de incremento no conteúdo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{MgO}$  conforme há avanço nos estágios de propilitização (amostras de DHE a DHE5), refletindo a incorporação de clorita como o principal mineral ferro-magnésiano da alteração hidrotermal. Os maiores teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  encontram-se nas amostras com avançada propilitização e nas mineralizadas, destacando-se as amostras do tipo brecha e em veio sulfetado, devido à abundante calcopirita como principal mineral de minério. Estágios de alteração com relativos enriquecimentos em  $\text{CaO}$  refletem a incorporação de minerais hidrotermais de composição cálcica, principalmente nos veios, tais como epidoto, actinolita e subordinadamente calcita. Não foi possível observar um comportamento progressivo do granito menos alterado para amostras propilitizadas, havendo ausência de trends específicos.

Quanto ao padrão de distribuição dos ETR (Fig. 5), percebe-se que o minério em veio é relativamente empobrecido em ETR leves e pesados, comparado com as amostras propilitizadas. Tais amostras propilitizadas mostram notável enriquecimento em ETR leves. Entre as amostras mineralizadas, o minério em veio é mais empobrecido em ETR pesados em relação às demais. Conforme a distribuição de elementos traços (Fig. 6), nota-se que o minério em brecha é empobrecido em Rb, Ba, U, Nb, Sr e Zr em relação ao minério em veio e apresentando assinatura fortemente negativa para Ba, Nb, Ta, Zr e Ti. Por este diagrama, a assinatura geoquímica do minério em veio é mais próxima daquela do granito menos alterado, enquanto a distribuição do minério em brecha tende a acompanhar aquela das amostras sulfetadas e silicificadas.

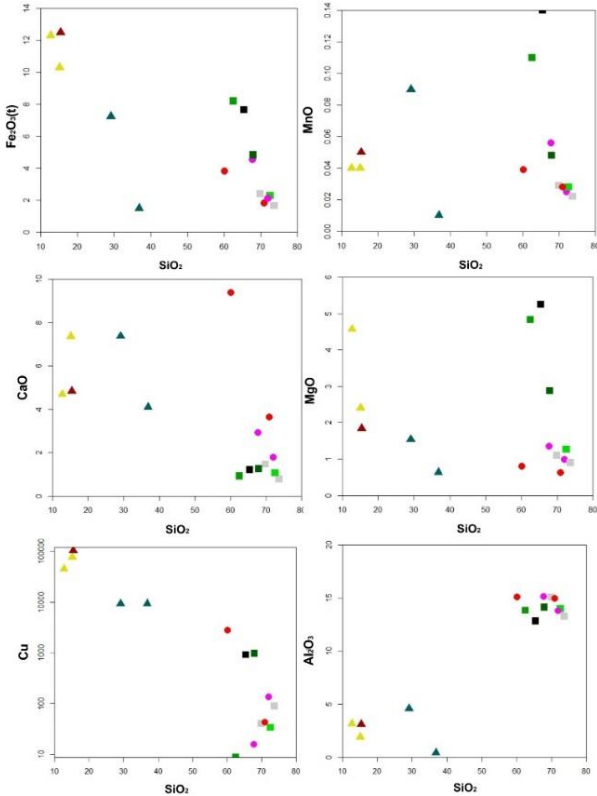


Fig. 3. Diagramas de Harker relacionando óxidos maiores (% peso) e elementos (ppm) em função da sílica.

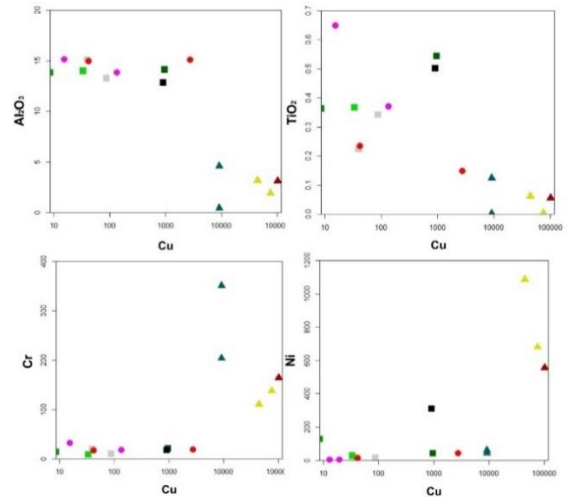


Fig. 4. Diagramas binários relacionando o conteúdo de cobre em função de outros constituintes (óxidos em % em peso e elementos em ppm).

**Simbologia adotada nos diagramas geoquímicos:**

- Granitos menos alterado (com albitização incipiente)
  - ▲ Minério em brecha (com silicificação e propilitização)
  - ▲ Amostras sulfetadas e silicificadas
  - Veios de act + ep + chl ± cal ± ab
  - ▲ Veio mineralizado de act + ep + chl ± cal ± ab, com cpy ± py
- Estágios de propilitização:
- Amostra DHE1
  - Amostra DHE2
  - Amostra DHE3
  - Amostra DHE4
  - Amostra DHE5

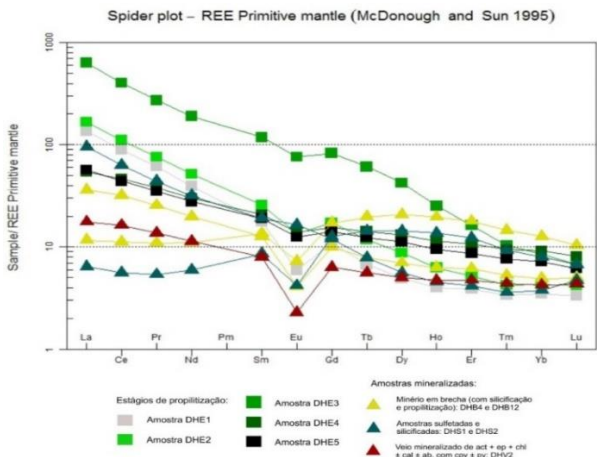


Fig. 5. Padrão de distribuição dos ETR nas amostras mineralizadas e nas representativas da alteração propilitica.

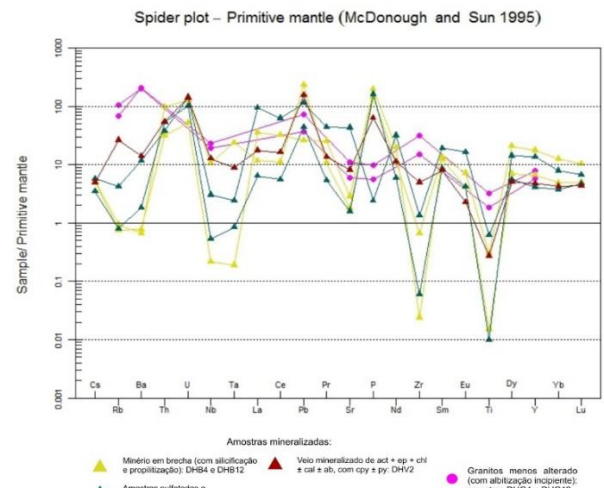


Fig. 6. Distribuição dos elementos traços nas amostras de granito menos alterado e nas mineralizadas.

O método de balanço de massa foi aplicado comparando-se pares do tipo “rocha menos alterada” vs “rocha mais alterada”, plotando concentrações de elementos e de óxidos em diagramas de isóconas, com os principais enriquecimentos (ganhos) e empobrecimentos (perdas) estimados. Gráficos de isóconas apresentam a concentração dos elementos na rocha considerada mais hidrotermalizada (ordenada) em função das concentrações na rocha considerada menos hidrotermalizada (abscissa). Pelos cálculos e diagramas, houve uma expressiva adição de metais pelos fluidos mineralizantes (e.g. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu, V, Cr, Zn, Ga, Sr, Y, Nb e Pb), denotando elevada razão fluido-rocha no evento hidrotermal de mineralização, nos quais as características dos

fluidos hidrotermais foram preponderantes em relação às características da rocha inicial. Desta forma, não necessariamente as amostras mineralizadas (veios e brechas) representam produto final decorrente diretamente da alteração do granito, após os progressivos estágios de alteração propilitica. Ou seja, não é possível afirmar que os minérios venular e em brecha são derivados de alteração progressiva a partir do protólito granítico, mas sim formados a partir da precipitação direta dos minerais a partir do fluido hidrotermal (*i.e., infill*). Confirmou-se certa mobilidade de elementos considerados como imóveis em sistemas hidrotermais (e.g. Ti, Nb, Zr, Sm, Y) razão também atribuída à elevada razão fluido-rocha nos eventos de mineralização.

Por fim, a assinatura geoquímica do minério de alto teor pode ser definida por enriquecimento em Cu-Fe-Mg-Ca-P-Zn-Cr-Ni-Co e baixo conteúdo de Al-K-Na-Ti-Rb-Ba-Sr-Zr-V. O enriquecimento em Ni-Cr-Co sugere participação de fluidos hidrotermais que tiveram influência de rochas máfica ultramáficas. Relatórios internos da VALE S.A. descrevem a presença no depósito Hades de rochas ultramáficas correlacionadas à Suíte Cateté, caracterizadas por piroxenitos e talco xistos, que fornecem anomalia positiva em Ni-Co-Cr em análises radiométricas. Reforça-se a hipótese de que o fluido hidrotermal responsável pela mineralização em brecha também teve contribuição de metais a partir de fontes máfica-ultramáficas regionalmente existentes na Província Carajás.

### Conclusões

O trabalho caracterizou as zonas de alteração hidrotermal no sistema cuprífero do Depósito Hades, sendo elas albitização, alteração propilitica, silicificação e formação de veios e vênulas, além de identificar as associações minerais correspondentes e os estilos de mineralizações em brecha e em vênulas. A pesquisa investigou os processos de interação fluido-rocha responsáveis por empobrecimentos e enriquecimentos relativos de elementos no sistema hidrotermal. Foi possível determinar a assinatura do minério de alto teor (definida por enriquecimento em Cu-Fe-Mg-Ca-P-Zn-Cr-Ni-Co e baixo conteúdo de Al-K-Na-Ti-Rb-Ba-Sr-Zr-V) e correlacionar diferentes associações minerais às mudanças relativas na composição química das zonas de alteração hidrotermal. No estudo da mobilidade de elementos, confirmaram a mobilidade de elementos considerados como imóveis em sistemas hidrotermais (e.g. Ti, Nb, Zr, Sm e Y), razão que pode ser atribuída à elevada razão fluido-rocha no evento de mineralização.

Nas análises geoquímicas, não foi possível observar um comportamento progressivo do granito menos alterado para amostras propilitizadas, havendo ausência de trends específicos. Desta forma, não se pode afirmar que o minério é decorrente de uma alteração progressiva a partir do protólito granítico. Quanto ao balanço de massa, todos os cálculos realizados considerando amostras mineralizadas resultaram em expressiva adição de metais pelo fluido mineralizante, principalmente Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu, V, Cr, Zn, Ga, Sr, Y, Nb e Pb. Considera-se que os resultados desse trabalho, ao serem integrados com os estudos que vem sendo desenvolvidos pelo grupo de pesquisa, podem fornecer informações significativas para a compreensão da evolução geológica do depósito Hades, inclusive fornecendo subsídios na reconstrução do sistema cuprífero.

### Referências bibliográficas

- Carvalho E.R. (2009) **Caracterização geológica e gênese das mineralizações de Óxido de Fe-Cu-Au e metais associados na Província Mineral de Carajás: Estudo de Caso do Depósito de Sossego**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- Botelho, N.F., Moura, M.A., Teixeira, L.M., Cunha, L.M., Olivo, G.R., Santana, M.U. **Caracterização geológica e metalogenética do Depósito de Cu (Au, W, Mo, Sn) Breves, Carajás**. 2005. Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia. Cap. VI. Brasília: DNPM-CT/Mineral-ADIMB.
- Grant J.A. (1986) **The Isocon Diagram: A simple solution to Gresens' Equation for metasomatic alteration**. Economic Geology, v 81, p. 1976 - 1982.
- Gresens R.L. (1967). **Composition-volume relationships of metasomatism**. Chemical Geology, v.2, p. 47 – 55.
- Lindenmayer, Z.G., Fleck, A., Gomes, C.H., Santos, A.B.S., Caron, R., Paula, F.C., Laux, J.H., Pimentel, M.M., Sardinha, A.S. **Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará**. 2005. Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia. Cap. IV. Brasília: DNPM-CT/Mineral-ADIMB.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., Dufrane S. A., Tassinari C.C.G., Sato K., Kemp A.I.S., Amaral W.S. (2015a) **Neoproterozoic and Paleoproterozoic Iron Oxide-Copper-Gold Events at the Sossego Deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb Geochronological Evidence**. Economic Geology, v 110, p. 809-835.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., Dufrane S. A., Melo G.H.C., Delinardo da Silva M.A., Tassinari C.C.G., Sato K. (2015b) **Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide-copper-gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil**. Mineralium Deposita. v 50, n. 5, p. 517-546.
- Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. (2008) **Texto Explicativo do Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Pará, escala 1:1.000.000**. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. Belém: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém.
- Xavier R.P.; Moreto C.P.N.; Melo G.H.C.; Toledo P.; Hunger R.; Delinardo M.; Faustinoni J.; Lopes A.; Monteiro, L.V.S.; Previato, M.; Jesus, S.S.G.P.; Huhn, S.B. (2017) **Geology and Metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic Copper Systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil**. Anais do 14th SGA Biennial Meeting, Quebec, Canadá.