



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

RAFAEL NASCIMENTO PAULA

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E MODELAGEM 3D DA MINA ANTAS
NORTE, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, BRASIL

FORTALEZA

2023

RAFAEL NASCIMENTO PAULA

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E MODELAGEM 3D DA MINA ANTAS NORTE,
PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Roberto Bacelar Hühn
Coorientador: Prof. Dr. Christiano Magini

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P349c Paula, Rafael Nascimento.
Caracterização geológica e modelagem 3D da mina Antas Norte, Província Mineral de Carajás, Brasil /
Rafael Nascimento Paula. – 2023.
91 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Geologia, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Sérgio Roberto Bacelar Hühn.
Coorientação: Prof. Dr. Christiano Magini.
1. Depósito ISCG. 2. Cobre. 3. Carajás. 4. Modelagem Geológica. I. Título.

CDD 551

RAFAEL NASCIMENTO PAULA

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E MODELAGEM 3D DA MINA ANTAS NORTE,
PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em: 20/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sérgio Roberto Bacelar Hühn (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Lucilene dos Santos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira
Universidade de Brasília (UNB)

Dedico esse trabalho à minha esposa Letícia,
aos meus pais Rilmar e Elizabeth, e aos meus
irmãos Reverso e Ryan.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pelo dom da vida e por todas as oportunidades que tive.

Aos meus pais Rilmar e Beth, por me terem trazido ao mundo, por toda dedicação, educação e apoio que sempre me deram.

Aos meus irmãos Reverso e Ryan, por todos os momentos compartilhados.

À minha esposa Letícia, que esteve ao meu lado em todos os momentos e pela compreensão ao longo dos últimos 2 anos que, em função da distância, não foram dos mais fáceis.

Ao Prof. Dr. Sérgio Bacelar Hühn, pela valiosa oportunidade que me foi dada, pela confiança que depositou em mim e por toda paciência. Sem sua orientação e ensinamentos esse trabalho não teria se concretizado.

Ao Prof. Dr. Christiano Magini, por todo apoio, pelos comentários pertinentes e os ensinamentos sobre geologia.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dra. Lucilene dos Santos e Prof. Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira pelo tempo e pelas valiosas colaborações.

Aos meus amigos de longa data, João Victor, Lucas, Ramon e Engelberto, que tanto me apoiaram e incentivaram.

Aos meus novos amigos de Nova Xavantina, pelos momentos especiais que me fizeram relaxar um pouco em meio a rotina de trabalho e estudo.

Ao amigo e geólogo Gabriel Valois, por toda ajuda e troca de conhecimento na modelagem 3D.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão, por um período, da minha bolsa de estudo – Código de Financiamento 001.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), através do Programa de Pós-Graduação em Geologia, pela infraestrutura laboratorial.

À OZ Minerals, em particular ao geólogo Jaílson Araújo, por viabilizar esse projeto, disponibilizar o banco de dados referente a pesquisa e pelo apoio durante a etapa de campo.

À Seequent, pelo fornecimento da licença do *software* Leapfrog Geo.

À Ero Brasil (Xavantina), empresa na qual eu trabalho, pela compreensão e incentivo para conclusão do mestrado.

“Somewhere, something incredible is waiting
to be known” (Carl Sagan).

RESUMO

A mina Antas Norte está localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico, na Província Mineral de Carajás. O corpo de minério encontra-se ao longo de uma zona de cisalhamento secundária NE-SW e é hospedado pelas rochas metavulcânicas máficas e félsicas do Supergrupo Itacaiúnas que foram, em quase sua totalidade, modificadas pelas alterações. O trabalho de campo e os dados petrográficos permitiram reconhecer uma associação de alterações hidrotermais que iniciou com a alteração sódica (albita) e foi seguida por alterações potássica (biotita + escapolita), cálcica (anfíbólio + apatita), silicificação (quartzo) e, finalmente, propilítica (clorita + epidoto + calcita). As rochas metavulcânicas foram alteradas sob regimes deformacionais que passaram de dúctil-frágil a frágil. Estando associada à alteração cálcica e ocorrendo de forma maciça, brechada ou em veios e vênulas, a mineralização do depósito produziu uma associação de minério composta principalmente por calcopirita, pirrotita e pirita, tendo como fase acessória ilmenita, esfalerita e pentlandita. Essas associações de alterações e minérios indicam que o sistema hidrotermal evoluiu com diminuição da temperatura, da salinidade e do pH. Diferente dos outros depósitos que ocorrem em Carajás, Antas Norte não apresenta a fase de óxido de ferro, apenas sulfetos de ferro. Diante desse fato, a melhor classificação para ele seria ISCG (Iron sulfide copper-gold), um subtipo do grande grupo IOCG (Iron oxide copper-gold). Um modelo 3D das diferentes alterações e da mineralização foi gerado usando dados de 157 furos de sondagem e 18 seções. O modelo revelou a importância da zona de cisalhamento para a formação do depósito, como também a geometria dos corpos. O corpo mineralizado tem forma tabular subvertical, podendo chegar até 350 metros de comprimento ao longo do strike, 200 metros de comprimento em profundidade e 35 metros de largura. O modelo foi responsável também por mostrar que a mineralização continua aberta em profundidade, porém, necessitando de um volume maior de dados para seu detalhamento.

Palavras-chave: depósito ISCG; cobre; Carajás; modelagem geológica.

ABSTRACT

Part of the Carajás Mineral Province, the Antas Norte mine is located in the southeast portion of the Amazon Craton. The ore body lies along an NE-SW secondary shear zone and is hosted by the mafic and felsic metavolcanic rocks of the Itacaiúnas Supergroup that were, almost in their entirety, modified by alterations. Fieldwork and petrographic data made it possible to recognize an association of hydrothermal alterations that began with sodic alteration (albite) and was followed by potassic alterations (biotite + scapolite), calcic alterations (amphibole + apatite), silicification (quartz), and, finally, propylitic (chlorite + epidote + calcite). Metavolcanic rocks were altered under deformational regimes that went from ductile-brittle to brittle. Being associated with calcic alteration and occurring massively, brecciated, or in veins and venules, the mineralization of the deposit produced an ore association composed mainly of chalcopyrite, pyrrhotite, and pyrite, with ilmenite, sphalerite, and pentlandite as accessory phases. These associations of alterations and ores indicate that the hydrothermal system evolved with a decrease in temperature, salinity, and pH. Unlike other deposits that occur in Carajás, Antas Norte does not have an iron oxide phase, only iron sulfides. Given this fact, the best classification for it would be ISCG (iron sulfide copper-gold), a subtype of the large IOCG group (iron oxide copper-gold). A 3D model of the different alterations and mineralization was generated using data from 157 drill holes and 18 sections. The model revealed the importance of the shear zone for the formation of the deposit as well as the geometry of the bodies. The mineralized body has a sub-vertical tabular shape, reaching up to 350 meters in length along the strike, 200 meters in depth, and 35 meters in width. The model was also responsible for showing that the mineralization remains open at depth, requiring a greater volume of data for detail.

Keywords: ISCG deposit; copper; Carajás; geological modelling.

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
1.1	Introdução.....	11
1.2	Objetivos.....	12
1.3	Materiais e Métodos.....	13
<i>1.3.1</i>	<i>Trabalho de campo.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.2</i>	<i>Estudos petrográficos.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.3</i>	<i>Dados estruturais.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.4</i>	<i>Modelagem 3D.....</i>	<i>14</i>
2	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	14
3	DEPÓSITOS DE ÓXIDOS DE FERRO COBRE-OURO (IOCG).....	19
3.1	Depósitos IOCG na Província Carajás.....	21
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
	REFERÊNCIAS	26
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E MODELAGEM 3D DA MINA ANTAS NORTE, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, BRASIL	41

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

A Província Carajás, localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico no Estado do Pará, hoje representa a principal província mineral do país e uma das mais importantes do mundo (Santos, 2003). Esta província destaca-se por apresentar depósitos gigantes de ferro de alto teor, manganês, platinóides, níquel e a maior quantidade conhecida de depósitos IOCG (Iron Oxide Copper-Gold; Hitzman et al. 1992) do mundo (Hühn & Nascimento 1997; Tallarico et al. 2005; Groves et al. 2010; Xavier et al. 2010; Pollard et al. 2018). Este cenário particularmente próspero decorre da evolução geológico-metalogenética da Província Carajás durante o Arqueano-Paleoproterozoico, que envolveu diversas bases e eventos de mineralização de metais preciosos em ambientes geotectônicos distintos (Grainger et al. 2008).

O grupo diversificado de depósitos óxidos de ferro cobre-ouro (IOCG) tem sido uma das classes mais controversas de depósitos de minério desde o seu reconhecimento como um novo tipo. No centro dos debates estão as questões de definição, classificação, os papéis das fontes magmáticas e não magmáticas de fluidos, fontes dos metais e configurações tectônicas. Apesar dos grandes esforços para esclarecer e restringir a definição de depósitos IOCG e entender suas configurações (Hitzman et al. 1992; Sillitoe, 2003; Williams et al. 2005; Corriveau, 2007; Groves et al. 2010; Barton, 2013), ainda existem questões conflitantes.

Algumas dessas questões decorrem do próprio nome IOCG, que descreve a mineralogia (óxido de ferro) associada aos principais minérios (cobre, ouro) nos depósitos. Como consequência, depósitos de origens, provavelmente, diferentes (por exemplo, fluidos magmáticos-hidrotermais versus não magmáticos ou fontes metálicas) foram incluídos por alguns pesquisadores no grupo de depósitos IOCG. Também problemática tem sido a variação nas definições dos teores exigidos de cobre e ouro para se qualificar como depósitos IOCG. Vários pesquisadores propuseram definições amplas, de modo que alguns depósitos ricos em óxido de ferro com pouco ou nenhum cobre ou ouro são considerados parte da 'família' IOCG como possíveis “membros finais” ou como depósitos “afiliados” (por exemplo, Hitzman et al. 1992; Williams et al. 2005; Corriveau, 2007; Barton, 2013).

Neste cenário, os depósitos de óxido de ferro cobre-ouro (IOCG) de Carajás representam um importante alvo para a indústria mineral. Os principais depósitos de IOCG em Carajás são Salobo (745,9 Mt @ 0,53% Cu e 0,26g/t Au; Vale, 2022), Cristalino (500 Mt @ 1,0% Cu e 0,3g/t Au; Hühn et al. 1999a), Igarapé Bahia/Alemão (219 Mt @ 1,4% Cu e 0,86g/t

Au; Tallarico et al. 2005), Sossego (345,6 Mt @ 0,80% Cu e 0,11g/t Au; Vale, 2022), Alvo 118 (170 Mt @ 1,0% Cu e 0,3g/t Au; Rigon et al. 2000), Pedra Branca (18 Mt @ 1.6% Cu e 0.41 g/t Au; Oz Minerals, 2022) e outros depósitos menores (Castanha, Bacaba, Visconde, Jatobá e Bacuri) .

A mina Antas Norte (1.9 Mt @ 0.7 % Cu e 0.2 g/t Au; Oz Minerals, 2020), operada pela Oz Minerals, está localizada na Província Mineral de Carajás (PMC), situada acerca de 25 quilômetros da cidade de Parauapebas. Diferente das outras minas e depósitos de Cu-Au que estão localizadas nos chamados “corredores norte e sul do cobre”, Antas Norte está na porção central. Apesar de sua proximidade com outros depósitos e sua importância econômica, a configuração geológica do depósito é pouco conhecida, especialmente a natureza de suas rochas hospedeiras, o conjunto de alterações hidrotermais, a mineralização e suas relações geométricas. Uma evolução paragenética similar, marcada por estágios subsequentes de alteração sódica, potássica, cálcica seguida por mineralização cupro-aurífero, é reconhecida em outros depósitos localizados na PMC, o que sugere a atuação de processos genéticos semelhantes.

Assim sendo, este trabalho reúne os resultados das análises petrográficas, onde permitiram delinear uma sequência paragenética consistente e o zoneamento espacial e temporal das alterações hidrotermais e da mineralização, bem como porções dos protólitos que resistiram as alterações. Foram realizadas também análises estruturais e modelagem 3D, resultando nos tipos de deformação e na caracterização geométrica das alterações e da mineralização, onde as mesmas deverão acrescentar informações importantes no entendimento e na consolidação de premissas que caracterizam as mineralizações na região.

1.2 Objetivos

Este trabalho objetivou o estudo das rochas hospedeiras, das zonas de alteração hidrotermal e da mineralização do depósito Antas Norte com o intuito de reconstituir o processo evolutivo de formação do mesmo, através da(o):

- (i) Caracterização das rochas hospedeiras, incluindo natureza do protólitos;
- (ii) Caracterização dos tipos, estilos e padrões de alteração hidrotermal e mineralização, visando à identificação de diferentes associações e de possíveis evidências de múltiplos pulsos de fluidos e sobreposições de eventos de mineralização;
- (iii) Compreender o comportamento estrutural do depósito;

- (iv) Compreender a geometria das alterações hidrotermais e da mineralização em subsuperfície, a fim de contribuir para a interpretação de outros depósitos e permitir uma exploração mineral mais eficiente.

1.3 Materiais e Métodos

1.3.1 Trabalho de campo

A etapa de campo foi realizada na área da mina Antas Norte, visando à descrição detalhada e sistemática de 10 testemunhos de sondagem e 9 afloramentos (a partir da realização de um mapeamento geológico), enfatizando-se a caracterização das rochas hospedeiras e a identificação de estilos e geometria das zonas de alteração hidrotermal, de tipos de minério e seus modos de ocorrência, as relações texturais entre os minerais de minério e de ganga e a influência de estruturas regionais no depósito, além de coleta sistemática de amostras.

1.3.2 Estudos petrográficos

Estudos petrográficos em luz transmitida e refletida foram desenvolvidos no Departamento de Geologia - UFC em lâminas delgadas-polidas confeccionadas a partir de 34 amostras dos testemunhos de sondagem. Os estudos petrográficos objetivaram a caracterização detalhada das rochas hospedeiras, os tipos e estilos de alteração hidrotermal e das relações texturais entre os minerais de minério e das diferentes zonas de alterações hidrotermais, a fim de reconstituir a evolução e o zoneamento espacial e temporal do sistema hidrotermal do depósito Antas Norte. Os estudos petrográficos também auxiliaram no reconhecimento das diferentes fases de deformação, relacionadas às diferentes microestruturas de deformação e zonas de alteração hidrotermal. Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) acopladas a EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) também foram realizadas no Departamento de Geologia - UFC visando à identificação de fases minerais não reconhecidas ao microscópio óptico como fases minerais acessórias, inclusões minerais ou mesmo elementos traços em minerais de minério ou eventuais texturas de substituição, e zoneamentos composicionais em minerais de minério e minerais hidrotermais.

1.3.3 Dados estruturais

Os dados estruturais foram analisados a partir dos diagramas de rosetas e da plotagem dos planos e dos polos no software Stereonet versão 9.2.3 (© Richard W. Allmendinger 2013). Ao todo foram utilizadas 57 medidas estruturais, obtidas a partir de medidas de foliação, falhas, fraturas e lineação mineral.

1.3.4 Modelagem 3D

O uso de modelos 3D para facilitar a compreensão da geologia de superfície e subsuperfície é bem estabelecido por vários autores (Houlding, 1994; Lemon & Jones, 2003; Calcagno et al. 2008; Kaufman & Martin, 2008; Maxelon et al. 2009; Gumiel et al. 2010b; Wang et al. 2013). O software de modelagem permite visualização 3D, análise de características espaciais, interpretação geológica e avaliação de recursos. Este estudo utilizou o Leapfrog Geo 2022 (Seequent - Bentley Company ©) para estabelecer um modelo 3D das alterações hidrotermais e mineralização do depósito Antas Norte, através da modelagem implícita. Neste trabalho, os dados utilizados incluíram mapa geológico e de alteração hidrotermal, levantamento topográfico da cava da mina (MDE – modelo digital de elevação), 18 seções e 157 furos de sondagem totalizando 30.657,55 metros perfurados. Para a construção do modelo, todos os dados foram organizados em um banco de dados único e importados para o Leapfrog Geo. O modelo foi gerado por meio de vetores de contato derivados das seções, dos furos e dos mapas, utilizando os dados topográficos como limitadores de extensão dos corpos. O grande número de dados de furos de sondagem e de seções permitiu validar os objetos geológicos de subsuperfície porque eles foram usados como restrições de profundidade.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Cráton Amazônico é composto por dois escudos, Guiana ao norte e Brasil Central ao sul, separados pela bacia sedimentar paleozoica Solimões-Amazonas. A Província Mineral de Carajás (PMC) está localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico, no Estado do Pará (Fig. 1A). A PMC constitui uma das maiores e mais bem preservadas áreas cratônicas arqueanas do mundo, e representa atualmente uma das mais importantes províncias minerais do mundo, dado o seu diversificado potencial metalogenético. Essa província é dividida em dois blocos tectônicos (Fig. 1B): o Domínio Rio Maria, a sul, e o Domínio Carajás (Fig. 1C), a norte (Santos 2003; Vasquez et al. 2008), separados por uma zona de cisalhamento regional E-W. Entre os dois domínios há um subdomínio de transição que representaria parte do Domínio Rio Maria retrabalhado no Neoarqueano (Dall’Agnol et al. 2006) ou parte do Domínio Carajás (Feio et al. 2013).

O Domínio Rio Maria apresenta predominância de faixas de greenstone belts e magmatismo mesoarqueano tonalítico-trondjemítico-granodiorítico (TTG), sanukitoide e granítico (Oliveira et al. 2009, 2010; Almeida et al. 2010, 2011). Os greenstone belts desse domínio apresentam idade mesoarqueana e são orientados nas direções E-W, NW-SE e NE-SW. Apresentam rochas metavulcânicas ultramáficas a máficas na base. No topo da sequência

ocorrem rochas metavulcânicas ácidas a intermediárias e metassedimentares clásticas e químicas. Além das rochas arqueanas, são reconhecidas bacias sedimentares paleoproterozoicas, granitos, diques félsicos e máficos relacionados a um evento magmático anorogênico do Orosiriano (Vasquez et al. 2008). A sua evolução geológica é dividida em dois eventos de crescimento continental: (i) 3,05-2,96 Ga na forma de arco continental, localizado no sul do domínio, representados pelo Supergrupo Andorinhas e pelos Grupos Lagoa Seca, Babaçu, Serra do Inajá e greenstone belt Identidade (Althoff et al. 2000; Dall’Agnol et al. 1997; Macambira e Lancelot 1996) e (ii) 2,87-2,82 Ga como arcos continental e de ilha representados pelos greenstone belts Tucumã, São Félix e Gradaús metamorfisados, localizados na região de São Félix do Xingu (Macambira e Lancelot 1996; Santos 2003; Vasquez et al. 2008).

O Domínio Carajás caracteriza-se por embasamento mesoarqueano, sequências supracrustais neoarqueanas e, intrusivas neoarqueanas e paleoproterozoicas. As rochas do embasamento são representadas pelos complexos Xingu e Pium, cujas rochas foram afetadas por metamorfismo de médio a alto grau em aproximadamente 2,85 Ga (Machado et al. 1991; Pidgeon et al. 2000; Pollard et al. 2018). O Complexo Xingu é composto por ortognaisses tonalíticos, trondhjemíticos, granodioríticos e migmatitos (Hirata et al. 1982; Vasquez et al. 2008), com idade de cristalização do protólito de $3066 \pm 6,6$ Ma (Silva 2014). O Complexo Pium é composto por ortogranulitos charnockíticos a enderbíticos e máficos (Vasquez et al. 2008) com idade de cristalização do protólito em 3002 ± 14 Ma (Pidgeon et al. 2000). Contudo, estudos recentes permitiram a individualização de novas unidades que originalmente eram atribuídas ao Complexo Xingu, mas que são formadas por diferentes tipos de granitóides (Moreto et al. 2011, 2015a, b; Feio et al. 2012, 2013).

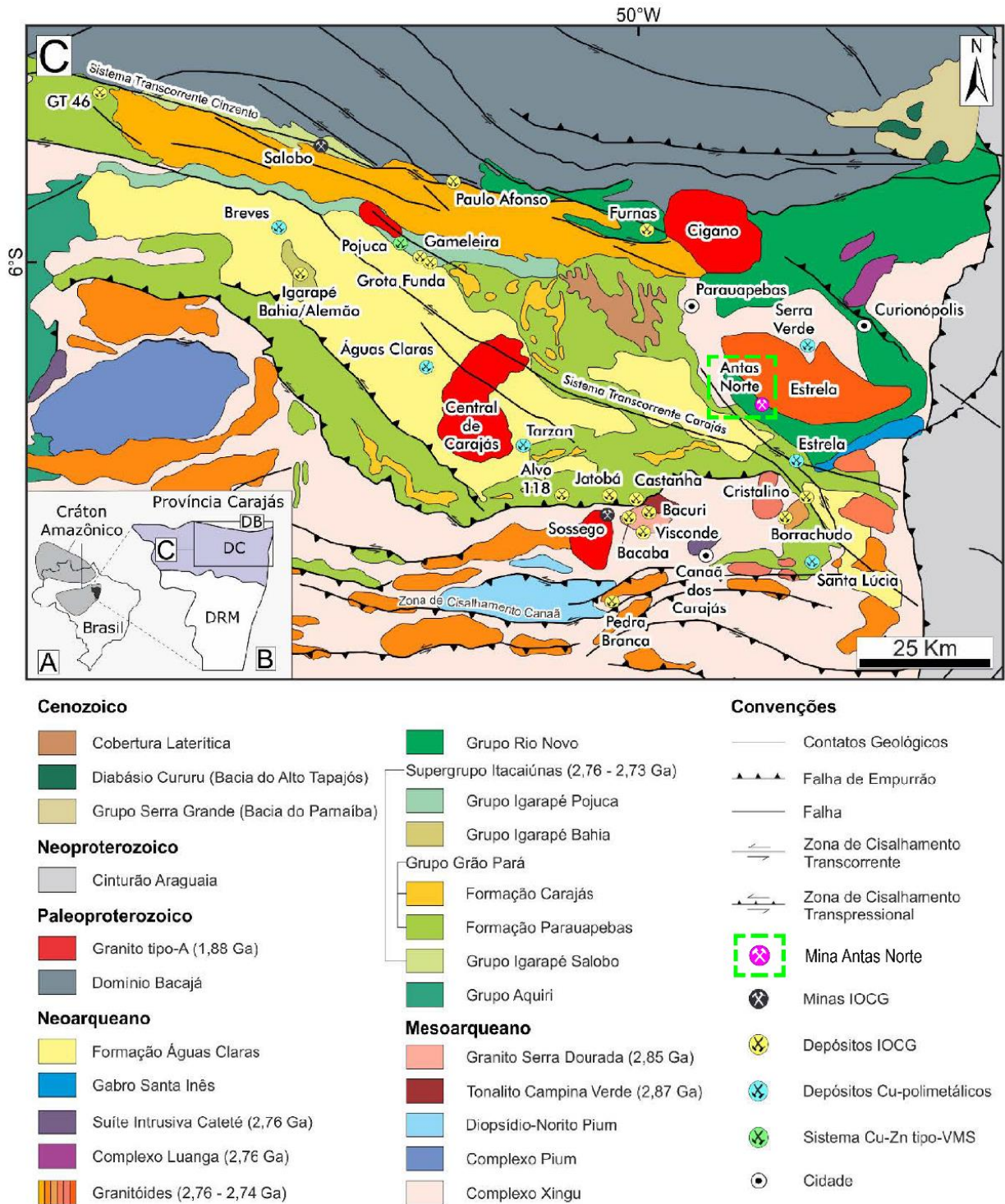


Figura 1: (A) Localização da Província Carajás (preto) no Cráton Amazônico (cinza claro). (B) Compartimentação da Província Carajás nos domínios Rio Maria (sul) e Carajás (norte). (C) Mapa geológico simplificado do Domínio Carajás, indicando a localização dos principais depósitos cupríferos e estruturas (Modificada de Vasquez et al. 2008).

As seqüências metavulcanossedimentares do Grupo Rio Novo (Hirata et al. 1982) e do Supergrupo Itacaiúnas (Wirth et al. 1986; Machado et al. 1991; DOCEGEO 1988), bem como as coberturas sedimentares da Formação Águas Claras (Araújo et al. 1988; Nogueira et al. 1995), representam as principais unidades supracrustais desse domínio.

O Grupo Rio Novo aflora na região do depósito de Serra Pelada, na porção nordeste do Domínio Carajás (Vasquez et al. 2008). É constituído por rochas metamáficas, metaultramáficas, quartzitos, formações ferríferas bandadas e filitos sericíticos (Hirata et al. 1982; Araújo e Maia 1991; Oliveira et al. 1994). A idade exata deste grupo ainda é incerta, entretanto a idade mínima estimada é de 2.763 ± 7 Ma (Machado et al. 1991), referente ao Complexo Máfico-Ultramáfico Luanga, intrusivo nesta unidade.

O Supergrupo Itacaiúnas foi dividido por DOCEGEO (1988) em unidades aproximadamente cronocorrelatas, representadas pelos grupos Igarapé Salobo, Grão Pará, Igarapé Pojuca e Igarapé Bahia.

O Grupo Igarapé Salobo (2761 ± 3 Ma, U-Pb zircão, Machado et al. 1991) é subdividido nas unidades Gnaiss Cascata na base, com anfibolitos e rochas metapelíticas; Formação Três Alfa, onde se observam as mineralizações do depósito de Salobo, constituída por anfibolitos, formações ferríferas e quartzitos; e Formação Cinzento no topo, com gnaisses, quartzitos e metagrauvas (DOCEGEO 1988). O Grupo Grão Pará (2758 ± 39 Ma, U-Pb zircão, Wirth et al. 1986; 2759 ± 2 Ma, U-Pb zircão, Machado et al. 1991; 2.760 ± 11 Ma, U-Pb zircão, Trendall et al. 1998) é constituído por uma sequência de rochas metavulcânicas englobando metabasaltos e metarriolitos, brechas, quartzitos e conglomerados da Formação Parauapebas e uma espessa sequência de rochas metassedimentares químicas, dolomitos e formações ferríferas bandadas jaspilíticas da Formação Carajás (DOCEGEO 1988; Zucchetti 2007; Vasquez et al. 2008), responsáveis por hospedar a mineralização de Ferro de Carajás.

O Grupo Igarapé Pojuca (2.732 ± 3 Ma, U-Pb zircão, Machado et al. 1991) é composto por rochas metavulcânicas básico-intermediárias intercaladas com rochas metassedimentares psamo-pelíticas e formações ferríferas bandadas, por sua vez intrudidas por rochas máficas (DOCEGEO 1988; Winter 1994; Lindenmayer et al. 2001b). Neste grupo podem ser observadas mineralizações de Cu-Au do depósito de Gameleira (Hühn e Nascimento 1997) e mineralizações de Cu-Zn-(Au-Ag) do depósito Pojuca (DOCEGEO 1988). O Grupo Igarapé Bahia (2748 ± 31 Ma, U-Pb zircão, Tallarico et al. 2005) tem sua ocorrência bastante restrita à área de ocorrência do depósito de óxido de Fe Cu-Au Igarapé Bahia/Alemão, sendo considerado como uma janela estrutural aflorante na Formação Águas Claras. É constituído por rochas metassedimentares, metavulcânicas máficas, metapiroclásticas ácidas a intermediárias e formações ferríferas (DOCEGEO 1988).

A Formação Águas Claras, definindo uma inconformidade angular, sobrepõe-se às sequências metavulcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas. É composta por rochas

siliciclásticas incluindo metaconglomerados, quartzitos, mármore, filito carbonoso e sericita quartzitos interpretados como depositados em ambiente de sedimentação fluvial a marinho raso (Nogueira et al. 1995). A idade desta unidade é controversa e, embora a idade de diques de metagabros e soleiras que a recortam (2.70 Ga a 2.65 Ga; Dias et al. 1996; Mougeot et al. 1996) suportem uma idade arqueana para a Formação, trabalhos recentes assumem idade paleoproterozoica (2.37-2.06 Ga; Justo et al. 2018; Araújo e Nogueira 2019; Araújo Filho et al. 2020).

As intrusões máfica-ultramáficas acamadadas que ocorrem no Domínio Carajás, de forma geral, são compostos por peridotitos, gabros e noritos associados à suíte magmática Serra Leste (Ferreira Filho et al. 2007) e à suíte intrusiva Cateté (Macambira e Ferreira Filho 2002). Complexos acamadados são representados pelo complexo Luanga (Machado et al. 1991; Mansur e Ferreira Filho 2016), Lago Grande (Teixeira et al. 2015), Serra do Onça e Serra do Puma (Macambira e Ferreira Filho 2002, 2005) e Vermelho (Siepierski 2016). Corpos máficos, como o gabro Santa Inês (DOCEGEO 1988) e o diopsídio norito Pium (Feio et al. 2012) também fazem parte das intrusões. Mineralizações de níquel, cromo e EGP ocorrem associadas aos corpos máfico-ultramáficos (Ferreira Filho et al. 2007; Mansur et al. 2020).

O magmatismo granítico no Domínio Carajás pode ser definido por três eventos principais. O primeiro deles, com idade entre 2,76 e 2,73 Ga, é representado pela formação de granitos alcalinos a metaluminosos, similares aos do tipo-A, que compreendem o Complexo Granítico Estrela (Barros et al. 1997) e os granitos Plaquê (Araújo et al. 1988), Planalto (Huhn et al. 1999a; Feio et al. 2012), Serra do Rabo (Sardinha et al. 2006) e Igarapé Gelado (Avelar et al. 1999; Barros et al. 2004; Sardinha et al. 2006), e apresentam-se com formas alongadas e concordantes com a estruturação regional de direção WNW–ESSE. O segundo, restrito à porção norte do Domínio Carajás e com idade de 2.57 Ga, é caracterizado por intrusões graníticas peralcalinas a metaluminosas nas proximidades da Zona de Cisalhamento Cinzento, representados pelos corpos graníticos Old Salobo e Itacaiúnas (Machado et al. 1991; Souza et al. 1996). O terceiro e mais recente, em 1.88 Ga, compreende os granitos alcalinos a subalcalinos do tipo-A Central de Carajás, Young Salobo, Cigano, Pojuca e Breves (Machado et al. 1991; Lindenmayer e Teixeira 1999). Enxames de diques máficos recortam os corpos graníticos (Teixeira et al. 2019). Essa granitogênese está associada à formação dos depósitos minerais na região. Alguns autores defendem sua contribuição direta (fornecimento dos fluidos) para as mineralizações, outros defendem sua contribuição indireta (fonte de calor para recircular os fluidos já existentes) para as mineralizações.

A estruturação geral do Domínio Carajás é marcada por três principais sistemas de cisalhamento WNW-ESE: Carajás e Cinzento, ao norte, e Canaã ao sul (Pinheiro et al. 2013). A foliação E-W amplamente reconhecida no Domínio Carajás e os dobramentos e falhamentos teriam sido causados por encurtamento com vetor NNW para SSW. De acordo com Pinheiro et al. (2013), o formato sigmoidal (“S-shape”) característico desse domínio é atribuído a um sistema de falhas sinistrais NE-SW, análogas a estruturas do tipo-R. Notavelmente, a PMC apresenta uma sucessão de intrusões ígneas e eventos extensionais de caráter transpressivo e transtensional (Pinheiro e Holdsworth, 1997a; Pinheiro e Holdsworth, 2000), demonstrando uma complexa evolução tectônica do Arqueano ao Paleoproterozoico.

3 DEPÓSITOS DE ÓXIDOS DE FERRO COBRE-OURO (IOCG)

A classe de depósitos IOCG representa mundialmente um dos grandes alvos da pesquisa mineral, desde a descoberta do depósito de Olympic Dam na Austrália (Roberts & Hudson, 1983), por apresentar reservas e teores significativos de Cu, além de enriquecimento polimetálico que inclui Au, Ag, U, ETR, Co, Ni, Pd, Nb e P. No entanto, o depósito Olympic Dam, na época de sua descoberta, era diferente até então de todas as classes de depósitos conhecidas (Roberts & Hudson 1983), não somente por seu tamanho e teor (2.000 Mt @ 1% Cu, 0,5g/t Au; Campbell et al. 1998), mas também pelo estilo e características geológicas. Apenas em 1992, o depósito de Olympic Dam foi considerado parte de uma classe, definida por Hitzman et al. (1992) como a dos depósitos de óxido de ferro cobre-ouro (Iron Oxide Copper-Gold ou IOCG).

Apesar do grande número de estudos realizados nesses depósitos, ainda não há um modelo genético consensual, uma vez que a diversidade de características dos depósitos IOCG relativas aos seus ambientes geotectônicos de formação, idades, rochas hospedeiras e tipos de alterações hidrotermais sugerem que distintos processos geológicos poderiam ter sido responsáveis pela gênese dos depósitos (Hitzman, 2000; Williams et al. 2005). Haynes (2000) ainda descreve depósitos de Cu-Au pobres em óxidos de ferro, porém, que ocorrem nas mesmas províncias metalogenéticas que os depósitos IOCG. Eles são comumente ricos em sulfetos de Fe e foram denominados como depósitos de sulfetos de ferro cobre-ouro (Iron Sulfide Copper-Gold ou ISCG).

Hitzman et al. (1992), Hitzman (2000), Haynes (2000), Sillitoe (2003), Barton & Johnson (2004), Williams et al. (2005), Pollard (2006), Corriveau (2007), Barton (2013), Pollard et al. (2018) e Skirrow (2022) apresentaram uma lista com as principais características

que formam uma definição descritiva dos depósitos do tipo IOCG e, em menor relevância, do tipo ISCG. Sendo essas características:

1. Os depósitos exibem uma associação espacial do minério de Cu-Au com rochas ricas em Fe (por exemplo, 15-60% em peso de Fe), com Fe hospedado por óxidos e/ou sulfetos. As razões Fe-óxido/Fe-sulfeto variam entre e dentro dos depósitos;
2. Sulfetos de cobre e ouro estão associados à enriquecimentos moderados a fortes de vários dos seguintes elementos que podem atingir o teor de minério em alguns depósitos: Ag, Co, Ni, Bi, Se, Te, In e/ou U, ETR, F, Ba e Mo, podendo essas concentrações serem controladas pela composição química das rochas encaixantes;
3. Quartzo hidrotermal geralmente não é abundante com mineralização rica em óxido de ferro, mas pode estar presente em zonas pobres em óxido de ferro e ricas em sulfeto de ferro;
4. Os depósitos estão associados, na maioria das vezes, às rochas hospedeiras vulcanossedimentares, variando de máfica a félsica, que sofreram metamorfismo de baixo a médio grau e, geralmente, são intensamente alteradas hidrotermalmente. A associação mineral específica dessas alterações depende da rocha hospedeira, da natureza dos fluidos hidrotermais, da razão fluido/rocha e do nível crustal. As principais alterações são sódica, sódico – cálcica, cálcica, potássica e propilítica;
5. Os depósitos estão associados a zonas de cisalhamento / zonas de falha, podendo apresentar baixo ou alto grau de mergulho e, a depender do tipo de deformação impressa na zona do depósito, o minério pode ocorrer de maneira maciça, formando brechas e/ou preenchendo veios;
6. A origem dos fluidos é um ponto controvertido por haver algumas linhas de pensamentos, mas, pelo menos, dois fluidos são identificados como relacionados à mineralização e à alteração rica em Fe em muitos depósitos, incluindo salmouras hipersalinas e de baixa salinidade; Fluidos ricos em CO₂ também estão comumente presentes. Evidências isotópicas e geoquímicas sugerem contribuições de água, halogênios e enxofre de fontes não magmáticas, bem como magmáticas ou rochas ígneas lixiviadas;

Uma das grandes questões quanto à gênese dos depósitos IOCG é a relação com magmatismo, isto é, se depósitos do tipo IOCG representam o produto de sistemas magmático-hidrotermais. Alguns autores sugerem que esses depósitos apresentam uma clara relação espacial com intrusões (Willians et al, 2000; Groves et al, 2010). Em outra vertente, Barton &

Johnson (2004) consideram que as intrusões representam apenas fonte de calor e, conseqüentemente, o motor para a circulação dos fluidos no sistema hidrotermal, mas que a fonte de fluidos e metais estaria associada às rochas hospedeiras. Pollard (2006) e Pollard et al. (2018) entendem que a formação dos depósitos IOCG não está relacionada espacialmente a intrusões, tendo apenas relações de cortes com a mineralização. Hitzman et al. (1992) ainda sugerem que a diversidade de atributos dos depósitos IOCG ao redor do mundo podem refletir formação dos depósitos em diferentes níveis crustais, o que influenciaria principalmente o padrão de alteração hidrotermal e a paragênese do minério desenvolvidos em cada depósito.

3.1 Depósitos IOCG na Província Carajás

A Província Mineral de Carajás apresenta a maior concentração conhecida de depósitos de óxido de Fe Cu-Au (IOCG; Hitzman et al. 1992) de classe mundial (Monteiro et al. 2008a), tais como: Salobo (745,9 Mt @ 0,53% Cu e 0,26g/t Au.; Vale, 2022), Cristalino (500 Mt @ 1,0% Cu e 0,3g/t Au; Hühn et al. 1999a), Igarapé Bahia/Alemão (219 Mt 1,4% Cu e 0,86g/t Au; Tallarico et al. 2005), Sossego (345,6 Mt @ 0.80% Cu e 0.11g/t Au; Vale, 2022) e Alvo 118 (170 Mt @ 1,0% Cu e 0,3g/t Au, Rigon 2000). Há ainda outros importantes alvos de pesquisa de Cu-Au tanto no setor norte quanto no setor sul do Domínio Carajás, por exemplo: Igarapé Cinzento/GT46, Furnas, Paulo Alfonso, Castanha, Bacaba, Bacuri, Jatobá, Visconde e Borrachudo. A vinculação dos depósitos cupro-auríferos da Província Carajás com a classe dos depósitos de óxido de ferro cobre-ouro (IOCG) foi proposta primeiramente por Hühn & Nascimento (1997).

As características distintivas nos depósitos IOCG de Carajás, tais como diferentes associações de alteração hidrotermal e de minerais de minério em cada um dos depósitos, parecem refletir a evolução dos sistemas hidrotermais em diferentes níveis crustais com diferentes interações fluido-rocha e fluido-fluido, que podem ainda representar eventos de sobreposição de sistemas hidrotermais. Essas particularidades identificadas em diferentes depósitos resultam da combinação de diversos fatores, tais como: fonte de fluidos, rochas hospedeiras, tipos e distribuição de alterações hidrotermais, influência das estruturas, metamorfismo regional, temperatura, pH e condição redox do fluido (Xavier et al. 2010, 2012).

Contudo, os depósitos de óxido de ferro cobre-ouro de Carajás apresentam algumas similaridades que incluem: (i) rochas hospedeiras variáveis, geralmente, incluindo unidades metavulcanicassedimentares do Supergrupo Itacaiúnas; (ii) forte controle estrutural (associação com zonas de cisalhamento); (iii) proximidade com intrusões de diferentes composições (granito, diorito e gabro); (iv) associação com brechas hidrotermais; (v) intensa alteração

hidrotermal; (vi) formação de óxidos de ferro e precipitação de sulfetos; (vii) concentrações significativas de ETR, P, U, Ni, W, Sn, Co e Pd; (viii) um amplo intervalo de temperaturas de homogeneização (100 a 570 °C) e salinidades (0 a 69% eq. peso NaCl), indicando a mistura de fluidos de origens diversas que possibilitaram o transporte e deposição dos metais (Monteiro et al. 2008a, Xavier et al. 2012).

Os depósitos IOCG localizados no setor norte do Domínio Carajás, próximo ao limite com o Domínio Bacajá, apresentam diferentes características (rochas hospedeiras, tipos e distribuição da alteração hidrotermal, influência das estruturas e metamorfismo regionais) em relação aos depósitos da parte sul. As zonas de alteração hidrotermal dos depósitos do cinturão norte do cobre (Salobo, Grota Funda, Igarapé Cinzento/GT 46) derivam de processos associados a elevadas temperaturas e condições dúcteis intimamente relacionadas ao desenvolvimento da Zona de Cisalhamento Cinzento (Lindenmayer 2003, Xavier et al. 2017). Tais depósitos mostram zonas de intensa alteração potássica, acompanhadas por significativo enriquecimento em ferro, seguidos por estágios tardios de cloritização (Réquia et al. 2003, Lindenmayer 2003).

Os depósitos do cinturão sul do cobre (Moreto 2013) são localizados na porção sul do Domínio Carajás e concentram-se no contato entre o embasamento e as rochas do Supergrupo Itacaiúnas, no contexto da denominada Zona de Cisalhamento Transcorrente de Canaã (Pinheiro et al. 2013). Esses depósitos exibem evolução paragenética semelhante (alteração sódica, sódica-cálcica, potássica, formação de magnetita, cloritização/epidotização, mineralização cuprífera e sericitização tardia) identificada nos corpos Sequeirinho, Pista e Baiano do depósito de Sossego (Monteiro et al. 2008a), no depósito Cristalino (Craveiro et al. 2019) e em inúmeros outros depósitos e alvos, tais como Castanha, Bacaba, Bacuri, Visconde e Jatobá (Monteiro et al. 2007, Augusto et al. 2008, Craveiro et al. 2012, Melo 2011, Pestilho et al. 2020), o que pode refletir sua colocação em um nível crustal profundo a intermediário. Entretanto, o depósito Alvo 118 (Torresi et al. 2012), assim como o Corpo Sossego do depósito Sossego (Monteiro et al. 2008a, 2008b), apresentam intensa alteração potássica, clorítica e hidrolítica, típicas de sistemas IOCG desenvolvidos em níveis crustais relativamente rasos.

A gênese dos depósitos IOCG de Carajás tem sido relacionada, por alguns autores, aos eventos de granitogênese reconhecidos no Domínio Carajás em: (i) 2,75-2,74 Ga (Hühn et al. 1999b; Galarza et al. 2003); (ii) 2,57 Ga (Réquia et al. 2003; Tallarico et al. 2005; Grainger et al. 2008), e (iii) 1,88 Ga (Pimentel et al. 2003; Tallarico 2003). O evento de 2,57 Ga seria responsável pelo estabelecimento de sistemas magmáticos-hidrotermais regionais (Tallarico et

al. 2005, Tavaza & Oliveira 2000, Réquia et al. 2003, Grainger et al. 2008), possibilitando a geração e circulação de fluidos em grande escala. No entanto, Moreto (2013) caracterizou apenas dois eventos hidrotermais nos depósitos IOCG no sul do Domínio Carajás, em 2,7 Ga e 1,88 Ga, o que restringe o evento de 2,57 Ga ao setor norte do Domínio Carajás, especificamente aos depósitos Salobo (Réquia et al. 2003) e Igarapé Bahia (Tallarico et al. 2005).

Os depósitos IOCG parecem ser contemporâneos com intrusões cálcio-alcálicas de alto K a shoshoníticas que foram colocados durante a deformação dúctil. Na porção norte, as idades da mineralização em Salobo (Re-Os, molibdenita, 2576 ± 8 Ma; Requia et al. 2003) e Igarapé Bahia (Pb-Pb, monazita, 2575 ± 12 Ma; Tallarico et al. 2005) são semelhantes aos 2,57 Ga (U-Pb) em zircão dos granitos Itacaiúnas e Velho Salobo (Machado et al. 1991; Souza et al. 1996). Já na porção sul, Sequeirinho (U-Pb, monazita, 2712 ± 5 Ma; Moreto et al. 2015b) e Pista (Re-Os, molibdenita, 2685 ± 11 Ma e 2710 ± 11 Ma; Moreto et al. 2015b) são semelhantes aos 2,72 Ga (U-Pb) da Suíte do Planalto (Feio et al. 2012).

Depósitos relacionados a granitos de 1.8 Ga, podemos incluir Breves (Tallarico et al. 2004; Botelho et al. 2005), Estrela (Lindenmayer et al. 2005; Volp 2005) e Gameleira (Lindenmayer et al. 2001b; Pimentel et al. 2003; Marschik et al. 2005), onde a mineralização ocorre nas zonas alteradas das cúpulas dos granitos tipo A Paleoproterozoicos, associados a sistemas de veios e brechas ricas em carbonato. Os depósitos Alvo 118 (Torresi et al. 2012), Águas Claras (Silva & Villas 1998), e Sossego-Curral (Monteiro et al. 2008a, 2008b; Moreto et al. 2015a) também parecem estar relacionados aos granitos de 1.8 Ga. Além de sulfetos de Cu-Fe, ouro e abundante quartzo, esses depósitos geralmente contêm uma variedade de B, Be, F, Li, Sn, W e Bi (Pollard et al. 2018).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização detalhada das rochas hospedeiras, dos padrões de alterações hidrotermais, da mineralização, bem como geologia estrutural e modelagem 3d realizada neste estudo forneceu informações suficientes para entendermos a evolução do depósito Antas Norte, tais informações são:

- O depósito está localizado nas proximidades da Falha Carajás (ESE-WNW), mas é especialmente controlada por uma zona de cisalhamento secundária NE-SW com cinemática dextral;

- O zoneamento espacial e temporal sugere que as alterações hidrotermais foram desenvolvidas devido a múltiplos pulsos de fluidos com reativações estruturais;
- As rochas metavulcânicas do Supergrupo Itacaiúnas representam as rochas hospedeiras do depósito e são variavelmente milonitizados e hidrotermalmente alteradas, com intensa interação fluido-rocha resultando em litótipos altamente modificados. O depósito é recortado por diques de gabros;
- A sequência de alteração hidrotermal compreende: (1) alteração sódica, representada pela albita; (2) alteração potássica, dominada por biotita e escapolita; e (3) alteração cálcica, com formação de hornblenda, actinolita e apatita generalizada, especialmente associada à mineralização. Esses processos de alteração pervasiva podem estar intrinsecamente relacionados à migração regional de fluidos hipersalinos profundos e metalíferos quentes dentro da Falha Carajás em níveis crustais relativamente profundos. A instalação da zona de cisalhamento secundária resultou no influxo de fluidos diluídos, ocasionando os últimos estágios de alterações, silicificação e propilítica;
- A zona de cisalhamento também é responsável pela mudança do regime deformacional que ocorre no depósito, evoluindo de dúctil-frágil para frágil, gerando assim desde rochas milonitizadas, até brechas e veios mineralizados, e pequenos conjuntos de falhas;
- Devido ao caráter mais redutor do fluido mineralizante, o conjunto de minério geralmente compreende calcopirita, sendo o principal mineral minério, seguido por pirrotita e pirita. Ilmenita, esfalerita, pentlandita e ouro ocorrem de maneira subordinada. A mineralização pode ocorrer de forma maciça, formando brechas ou até em formato de veio e vênulas, estando associada, principalmente, à alteração cálcica;
- Diferente dos outros depósitos do tipo IOCG que ocorrem na PMC, Antas Norte não apresenta a fase dos óxidos de ferro, podendo assim ser classificada como, ISCG, um subtipo dos depósitos IOCG que apresentam apenas sulfetos de ferro, trazendo uma nova perspectiva para a classificação dos depósitos de Cu-Au na PMC;
- A falta de óxidos de ferro que ocorre no depósito Antas Norte pode ser entendida devido ao consumo total da magnetita rica em titânio e transformada em ilmenita, a partir de reação de oxiexsolução;
- A evolução paragenética aponta para mudanças de parâmetros físico-químicos, como queda da temperatura (alteração sódica de mais alta temperatura, para alteração propilítica de mais baixa temperatura), acompanhada de diminuição da salinidade e do pH, resultando na precipitação do minério;

- As diferenças quanto às associações de minerais, condições redox e relações Cu/Fe do fluido, e os níveis crustais onde ocorreram a mineralização e as alterações hidrotermais são sugestivos de que o sistema hidrotermal/mineralizante iniciou em níveis mais profundos e terminou em níveis intermediários;
- Neste trabalho é apresentado um modelo 3D mostrando as características geométricas do depósito Antas Norte e as relações de contanto entre as rochas hospedeiras e a mineralização. Foram definidos cinco corpos principais, diferenciando-se claramente zonas mineralizadas, alterações hidrotermais e diques de gabro;
- A partir do modelo 3D foi possível entender o papel de conduto principal que a zona de cisalhamento exerceu para a formação da mineralização e para determinação de sua geometria tabular verticalizada;
- A geometria e as relações entre os depósitos minerais e a evolução estrutural em diferentes escalas devem ser cuidadosamente estudadas, para ser possível explicar a origem destes tipos de mineralização e a sua prospectividade. De acordo com o modelo proposto, a mineralização permanece aberta em profundidade, apresentando um possível plunge para sudoeste, porém, é necessário a realização de furos mais profundos para inserir novos dados no modelo e, assim, garantir a viabilidade do projeto;
- Como uma possível aplicação prática desse estudo, podemos citar a vetorização das zonas alterações hidrotermais e da mineralização. Com a delimitação precisa dos distintos corpos, é possível definir com maior precisão os alvos da exploração mineral e estimar onde se encontram as zonas mais propícias para as ocorrências das mineralizações cupríferas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. A. C., DALL'AGNOL, R., DIAS, S. B., ALTHOFF, F. J. Origin of the Archean leucogranodiorite–granite suites: Evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. **Lithos**, 187: 201-221, 2010.
- ALMEIDA, J. A. C., DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, M. A., MACAMBIRA, M. J. B., PIMENTEL, M. M., RÄMÖ, O. T., GUIMARÃES, F. V., LEITE, A. A. S. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. **Precambrian Research**. 120: 235-257, 2011.
- ALTHOFF, F., BARBEY, P., BOULLIER, A. M. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: The Archaean granitoids of Marajoara (Carajas Mineral Province, Brazil). **Precambrian Research**. 104, 187–206, 2000.
- ARAÚJO FILHO, R. C., NOGUEIRA, A. C. R., ARAÚJO, R. N. New stratigraphic proposal of a Paleoproterozoic siliciclastic succession: Implications for the evolution of the Carajás Basin, Amazonian craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 102, p. 102665, 2020.
- ARAÚJO, O. J. B., MAIA, R. G. N. **Serra dos Carajás, folha SB.22-ZA, Estado do Pará**. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 136 p, 1991.
- ARAÚJO, O. J. B., MAIA, R. G. N., JORGE-JOÃO, X. S., COSTA, J. B. S. A megaestruturação da folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 7, Proceedings, **Anais**, p. 324–333, 1988.
- ARAÚJO, R. N., NOGUEIRA, A. C. R. Serra Sul diamictite of the Carajás Basin (Brazil): a paleoproterozoic glaciation on the amazonian craton: **Geology**, v. 47, p. 1166–1170, 2019.
- ARIAS, M., NUÑEZ, P., ARIAS, D., GUMIEL, P., CASTAÑÓN, C., FUERTES-BLANCO, J., MARTIN-IZARD, A. 3D Geological Model of the Touro Cu Deposit, A World-Class Mafic-Siliciclastic VMS Deposit in the NW of the Iberian Peninsula. **Minerals**, 11, 85, 2021.
- AUGUSTO, R. A., MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R., SOUZA FILHO, C. R. Zonas de alteração hidrotermal e paragéneses do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, 38: 263-277, 2008.
- AUSTIN, J., BJÖRK, A., PATTERSON, B. Structural controls of the Ernest Henry IOCG deposit: Insights from integrated structural, geophysical and mineralogical analyses., **ASEG Extended Abstracts**, 2019:1, 1-5, 2019.
- AVELAR, V. G., LAFON, J. M., CORREIA JÚNIOR, F. C., MACAMBIRA, E. M. B. O magmatismo arqueano da região de Tucumã - Província Mineral De Carajás: Novos resultados geocronológicos. **Revista Brasileira de Geociências**, 29:453 – 460, 1999.
- BARROS, C. E. M., DALL'AGNOL, R., BARBEY, P., BOULLIER, A. M. Geochemistry of the Estrela Granite Complex, Carajás region, Brazil: an example of an Archaean A-type granitoid. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, p. 321- 330, 1997.

BARROS, C. E. M., BARBEY, P. A importância da granitogênese tardiarqueana (2.5 Ga) na evolução tectono-metamórfica da Província Mineral de Carajás-O Complexo Granítico Estrela e sua auréola de contato: **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, p. 513–522, 1998.

BARROS, C. E. M., MACAMBIRA, M. J. B., BARBEY, P., SCHELLER, T. Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: Implicações petrológicas e tectônicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, p. 531–538, 2004.

BARTON, M. D. Iron Oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. In **Treatise on Geochemistry**: Second Edition. Elsevier Inc. Vol. 13, p. 515–541, 2013.

BARTON, M. D., JOHNSON, D. A. Footprints of Fe-oxide (-Cu-Au) systems. SEG 2004: **Predictive Mineral Discovery Under Cover**. Centre for Global Metallogeny, Spec. Pub. 33, The University of Western Australia, p. 112-116, 2004.

BOTELHO, N. F., MOURA, M. A., TEIXEIRA, L. M., OLIVO, G. R., CUNHA, L. M., SANTANA, M. U. Caracterização geológica e metalogenética do depósito de Cu ± (Au, W, Mo, Sn) Breves, Carajás. In: Marini OJ, Queiroz ET, Ramos BW (eds) **Caracterização do depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia**. DMNP-CT-mineral / FINEPADIMB, p 339–389, 2005.

BUDDINGTON, A. F., LINDSLEY, D. H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. **Journal of Petrology**, v. 5, p. 310–357, 1964.

CALCAGNO, P., COURRIOUX, G., GUILLEN, A., CHILES, J. P. Geological modelling from field data and geological knowledge. Part I. modelling method coupling 3D potentialfield interpolation and geological rules. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v 171, 147–15, 2008.

CAMPBELL, J. H., COMPSTON, D. M., RICHARDS, J. P., JOHNSON, J. P., KENT, A. R. J. Review of the application of isotopic studies to the genesis of Cu-Au mineralisation at Olympic Dam and Au mineralisation at Porgera, the Tennant Creek district, and Yilgarn craton. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 45, p. 201–218, 1998.

CARNEIRO, L. S. **Assinatura litogeoquímica dos sistemas cupríferos neoarqueanos e paleoproterozoicos da Província Carajás, Cráton Amazônico, Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 160 p, 2021.

CASE, G., BLENKINSOP, T., CHANG, Z., HUIZENGA, J. M., LILLY, R., MCLELLAN, J. Delineating the structural controls on the genesis of iron oxide–Cu–Au deposits through implicit modelling: a case study from the e1 group, cloncurry district, australia. **Geological Society London**, Special Publications, v. 453, n. 1, p. 349-384, 2017.

CORRIVEAU, L. Iron oxide copper-gold deposits: A Canadian perspective. In W. D. Goodfellow (Ed.), **Mineral deposits in Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces and exploration methods**, p. 307–328, 2007.

CRAVEIRO, G. S., VILLAS, R. N., COSTA SILVA, A. R. Depósito Cu-Au Visconde, Carajás (PA): geologia e alteração hidrotermal das rochas encaixantes. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42(3), p. 453-470, 2012.

CRAVEIRO, G. S., XAVIER, R. P., VILLAS, R. N. N. The Cristalino IOCG deposit: an example of multi-st age events of hydrothermal alteration and copper mineralization. **Brazilian Journal of Geology**, v. 49(1), p. 1-18, 2019.

DALL'AGNOL, R., SOUZA, Z. S., ALTHOFF, F. J., BARROS, C. E. M., LEITE, A. A. S., JORGE JOÃO, X. S. General Aspects of the granitogenesis of the Carajás Metallogenic province, in: **Second International Symposium on Granites and Associated Mineralizations**. Salvador, p. 135–161, 1997.

DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, M. A., ALMEIDA, J. A. C., ALTHOFF, F. J., LEITE, A.A.S., OLIVEIRA, D. C., BARROS, C. E. M. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton: **Symposium on magmatism, crustal evolution and metallogenesis of the Amazonian Craton**, Belém, Excursion Guide, p. 99–150, 2006.

DIAS, G. S., MACAMBIRA, M. B., DALL'AGNOL, R., SOARES, A. D. V. BARROS, C. E. M. Datações de zircões de sill de metagabro: comprovação de idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás, Pará. In: **Simpósio de Geologia da Amazônia.**, 5, SBG, Belém, p. 376-378, 1996.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 35, SBG, p. 11 – 54, 1988.

DOMINGOS, F. H. G. **The Structural Setting of the Canaã dos Carajás Region and Sossego-Sequeirinho Deposits, Carajás Brazil**. Doctor of Philosophy thesis. University of Durham, Durham, p. 483, 2009.

DUNCAN, R. J., HITZMAN, M. W., NELSON, E.P., TOGTOKHBAYAR, O. Structural and Lithological Controls on Iron Oxide Copper-Gold Deposits of the Southern Selwyn-Mount Dore Corridor, Eastern Fold Belt, Queensland. **Australia. Economic Geology**, v. 109 (2), p. 419–456, 2014.

FEIO, G. R. L., DALL'AGNOL, R., DANTAS, E. L., MACAMBIRA, M. J. B., GOMES, A. C. B., SARDINHA, A. S., OLIVEIRA, D. C., SANTOS, R. D., SANTOS, P. A. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites?. **Lithos**, v. 151, p. 57–73, 2012.

FEIO, G. R. L., DALL'AGNOL, R., DANTAS, E. L., MACAMBIRA, M. J. B., SANTOS, J. O. S., ALTHOFF, F. J., SOARES, J. E. B. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 157–185, 2013.

- FERREIRA FILHO, C. F., CANÇADO, F., CORREA, C., MACAMBIRA, E. M. B., JUNQUEIRA-BROD, T. C., SIEPIERSKI, L. Mineralizações estratiformes de PGE-Ni associadas a complexos acamadados em Carajás: os exemplos de Luanga e Serra da Onça. In: Rosa-Costa L.T., Klein E.L., Viglio E.P. (eds.). **Contribuições à geologia da Amazônia**. SBG-Núcleo Norte, Belém, p. 1-14, 2007.
- FOURNIER, R. O. Active hydrothermal systems as analogues of fossil systems: In: Eaton, G., (eds.). *The Role of Heat in the Development of Energy and Mineral Resources in the Northern Basin and Range Province*. **Geothermal Resources Council Special Report**, v. 13, p. 263–284, 1983.
- GALARZA, M. A., MACAMBIRA, M. J. B. MOURA, C. A. V. Geocronologia Pb-Pb e Sm-Nd das rochas máficas do depósito Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA). In: **7º Simpósio de Geologia da Amazônia**, [CD-ROM], 2003.
- GARCIA, V. B., SCHUTESKY, M. E., OLIVEIRA, C. G., WHITEHOUSE, M. J., HÜHN, S. R. B., AUGUSTIN, C. T. The Neoproterozoic GT-34 Ni deposit, Carajás mineral Province, Brazil: An atypical IOCG-related Ni sulfide mineralization, **Ore Geology Reviews**, v. 127, 2020.
- GRAINGER, C. J., GROVES, D. I., TALLARICO, F. H. B., FLETCHER, I. R. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralization. **Ore Geology Reviews**, v. 33, p. 451-489, 2008.
- GROVES, D. I., BIERLEIN, F. P., MEINERT, L. D., HITZMAN, M. W. Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits. **Economic Geology**, v. 105, p. 641-654, 2010.
- GUMIEL, P., ARIAS, M., MARTÍN-IZARD, A. 3D geological modelling of a polyphase deformed pre-Variscan IOCG mineralization located at the southeastern border of the Ossa Morena Zone, Iberian Massif (Spain). **Geological Journal**, v. 45, p. 623–633, 2010.
- HADDAD-MARTIM, P. M., SOUZA FILHO, C. R., CARRANZA, E. J. M. Spatial analysis of mineral deposit distribution: A review of methods and implications for structural controls on iron oxide-copper-gold mineralization in Carajás, Brazil, **Ore Geology Reviews**, v. 81(1), p. 230-244, 2017.
- HAGGERTY, S. Opaque mineral oxides in terrestrial igneous rocks: **Mineralogical Society of America, Short Course Notes**, v. 3, p. 101–300, 1976.
- HAYNES, D. W. Iron oxide copper (-gold) deposits: their position in the deposit spectrum and modes of origin. In **Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective**, Australian Mineral Foundation, v. 1, p. 71–90, 2000.
- HIRATA, W. K., RIGON, J. C., KADEKARU, K., CORDEIRO, A. A. C., MEIRELES, E. A. Geologia Regional da Província Mineral de Carajás: **Simpósio de Geologia da Amazônia**, Belém, Abstracts, p. 100-110, 1982.

- HITZMAN, M. W. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when and why? In T. M. Porter (Ed.), **Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective**, Australian Mineral Foundation, v. 1, p. 9–25, 2000.
- HITZMAN, M. W., ORESKES, N., EINAUDI, M. T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. **Precambrian Research**, v. 58, p. 241–287, 1992.
- HOLDSWORTH, R., PINHEIRO, R. The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. **Journal of Structural Geology**, v. 22, p. 1105 – 1123, 2000.
- HOULDING, S. W. 3D Geoscience Modeling-Computer Techniques for Geological Characterization. **Springer-Verlag**, Berlin, Germany, p. 1–6, 1994.
- HUANG, X-W., BEAUDOIN, G. Textures and Chemical Compositions of Magnetite from Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) and Kiruna-Type Iron Oxide-Apatite (IOA) Deposits and Their Implications for Ore Genesis and Magnetite Classification Schemes. **Economic Geology**, v. 114 (5), p. 953–979, 2019.
- HÜHN, S. R. B., SILVA, A. M., FERREIRA, F. J. F., BRAITENBERG, C. Mapping New IOCG Mineral Systems in Brazil: The Vale do Curaçá and Riacho do Pontal Copper Districts. **Minerals**, 10, 1074, 2020.
- HÜHN, S. R. B., SOUZA, C. I. J., ALBUQUERQUE, M. C., LEAL, E. D., BRUSTOLIN, V. Descoberta do depósito Cu (Au) Cristalino: Geologia e mineralização associada região da Serra do Rabo - Carajás - PA. In: SBG, **Simpósio de Geologia da Amazônia**, 6, Boletim de Resumos, p. 140–143, 1999a.
- HÜHN, S. R. B., MACAMBIRA, M. J. B., DALL'AGNOL, R. Geologia e geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás-PA. In: SBG, **Simpósio de Geologia da Amazônia**, 6, Boletim de Resumos, p. 463-466, 1999b.
- HÜHN, S. R. B., NASCIMENTO, J. A. S. São os depósitos cupríferos de Carajás do tipo Cu-Au-U-ETR?. In: M.L. Costa & R.S. Angélica (eds.) **Contribuições à Geologia da Amazônia**. FINEP, SGB-NO, p. 143-160, 1997.
- HUNGER, R. B. **O depósito de óxido de ferro cobre-ouro (IOCG) Grota Funda, Domínio Carajás (PA): alteração hidrotermal, regime de fluidos e idade da mineralização**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 92 p, 2017.
- HUNT, J., BAKER, T., THORKELSON, D. A review of iron oxide copper-gold deposits, with focus on the Wernecke Breccias, Yukon, Canada, as an example of a non-magmatic end member and implications for IOCG genesis and classification. **Exploration and Mining Geology**, v. 16, p. 209-232, 2007.
- JUSTO, A. P., DANTAS, E. L., FREITAS-SILVA, F. H., RODRIGUES, J. B. Detrital Zircon Populations in the Neoproterozoic to Paleoproterozoic Sedimentary Coverage of Carajás, Amazon Cráton, Brazil, in **49th Congresso Brasileiro de Geologia**: Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, 2018.

- JESUS, S. S. G. P. **Múltiplos estágios de alteração hidrotermal do depósito de óxido de ferro-cobre-ouro Furnas, Província Carajás: evolução paragenética e química mineral.** Dissertação (Mestrado): IGc/USP, 164 p, 2016
- KAMPMANN, T. C., STEPHENS, M. B., WEIHED, P. 3D modelling and sheath folding at the Falun pyritic Zn-Pb-Cu-(Au-Ag) sulphide deposit and implications for exploration in a 1.9 Ga ore district, Fennoscandian Shield, Sweden. **Mineralium Deposita**, v. 51, p. 665–680, 2016.
- KAUFMANN, O., MARTIN, T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences*, v. 34, p. 278–290, reprint in **Computers & Geosciences**, v. 35, p. 70–82, 2009.
- LANCASTER OLIVEIRA, J., FANTON, J., ALMEIDA, A. J., LEVEILLE, R. A., VIEIRA, S. Discovery and geology of the Sossego copper-gold deposit, Carajás District, Pará State, Brazil: International Geology Congress, 31st, Proceedings, **International Union of Geological Sciences**, [CD-ROM], 2000.
- LEMON, A. M., JONES, N. L. Building solid models from boreholes and user- defined crosssections. **Computers & Geosciences**, v. 29, p. 547–555, 2003.
- LI, B., PENG, Y., ZHAO, X., LIU, X., WANG, G., JIANG, H., WANG, H., Yang, Z. Combining 3D Geological Modeling and 3D Spectral Modeling for Deep Mineral Exploration in the Zhaoxian Gold Deposit, Shandong Province, China. **Minerals**, v.12, 1272, 2022.
- LINDENMAYER, Z. G., TEIXEIRA, J. B. G. Ore genesis at the Salobo copper deposit, Serra dos Carajás. In: Silva M. G., Misi A. (eds.). **Base Metal Deposits of Brazil.** MME/CPRM/DNPM, Belo Horizonte, p. 33-43, 1999.
- LINDENMAYER, Z. G., PIMENTEL, M. M., RONCHI, L. H., ALTHOFF, F. J., LAUX, J. H., ARAÚJO, J. C., FLECK, A., BAECKER, C. A., CARVALHO, D. B., NOWATZKI, A. C. Geologia do depósito de Cu-Au de Gameleira Serra dos Carajás, Pará. In: Jost H., Brod J.A., Quieroz E.T. (eds.) **Caracterização de depósitos auríferos em distritos mineiros brasileiros.** Brasília, ADIMB-DNPM, p. 79-139, 2001b.
- LINDENMAYER, Z. G. Depósito de Cu–Au do Salobo, Serra dos Carajás: Uma revisão. In: L.H. Ronchi and F.J. Althoff (Eds.), **Caracterização e modelamento de depósitos minerais.** Editora Unisinos, São Leopoldo, p. 69–98, 2003
- LINDENMAYER, Z. G., FLECK, A., GOMES, C. H., SANTOS, A. B. S., CARON, R., PAULA, F. C., LAUX, J. H., PIMENTAL, M. M., SARDINHA, A. S. Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará. In: Marini OJ, Queiroz ET, Ramos BW (eds) **Caracterização do depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia.** DMNPCT-mineral/FINEP-ADIMB, p. 157–225, 2005.
- LOPES, A. M. **Caracterização geológica e metalogenética do depósito IOCG Pantera, domínio Rio Maria, Carajás-Pará.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 93 p, 2018.

- MACAMBIRA, E. B. M., FERREIRA FILHO, C. F. Exploration and origin of stratiform PGE mineralization in the Serra da Onça layered complex, Carajás Mineral Province, Brazil. In: **10th International Platinum Symposium Extended Abstract**, Oulu, 2005.
- MACAMBIRA, E. B. M., FERREIRA FILHO, C. F. Fracionamento magmático dos corpos máfico ultramáficos da Suíte Intrusiva Cateté – sudeste do Pará. In: Klein EL, Vasquez ML, Rosa-Costa LT (Eds) **Contribuições à geologia da Amazônia**. Belém, SBG-Núcleo Norte, p. 105-114, 2002.
- MACAMBIRA, M. J. B., LANCELOT, J. R. Time constraints for the formation of the Archean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Craton, Brazil. **International Geology Review**, v. 38, p. 1134–1142, 1996.
- MACHADO, N., KROUGH, T. E., LINDENMAYER, Z. G. U–Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás Area, Amazon Shield, Brazil. **Precambrian Research**, v. 49, p. 1–26, 1991.
- MANSUR, E. T., FERREIRA FILHO, C. F., OLIVEIRA, D. P. The Luanga deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: Different styles of PGE mineralization hosted in a medium-size layered intrusion. **Ore Geology Reviews**, v. 118: 103340, 2020
- MANSUR, E. T., FERREIRA FILHO, C. F. Magmatic structure and geochemistry of the Luanga Mafic-Ultramafic Complex: Further constraints for the PGE-mineralized magmatism in Carajás, Brazil. **Lithos**, 2016.
- MARQUES, I. P. **O depósito de óxido de ferro-cobre-ouro de Bacuri, Província Carajás, Pará: implicações de processos metassomáticos em rochas metaultramáficas para a evolução do sistema hidrotermal**. Dissertação (Mestrado): IGc/USP, 150 p, 2015.
- MARTIN-IZARD, A., ARIAS, D., ARIAS, M., GUMIEL, P., SANDERSON, D.J., CASTAÑÓN, C., LAVANDEIRA, A., SANCHEZ, J. A new 3D geological model and interpretation of structural evolution of the world-class Rio Tinto VMS deposit, Iberian Pyrite Belt (Spain). **Ore Geology Reviews**, v. 71, p. 457–476, 2015.
- MARSCHIK, R., MATHUR, R., RUIZ, J., LEVEILLE, R.A., ALMEIDA, A-J. Late Archean Cu-Au-Mo mineralization at Gameleira and Serra Verde, Carajás Mineral Province, Brazil: constraints from Re-Os molybdenite ages. **Mineralium Deposita**, v. 39, p. 983–991, 2005.
- MAXELON, M., RENARD, P., COURRIOUX, G., BRANDLI, M., MANCKTELOW, N. A workflow to facilitate three-dimensional geometrical modelling of complex poly-deformed geological units. **Computers & Geosciences**, v. 35, p. 644–658, 2009.
- MELO, G. H. C., MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R. P., MORETO, C. P. N., SANTIAGO, E. S. B. Tracing fluid sources for the Salobo and Igarapé Bahia Deposits: Implications for the genesis of the iron oxide copper-gold deposits in the Carajás Province, Brazil. **Economic Geology**, v. 114 (4), p. 697–718, 2019.

MELO, G. H. C., MONTEIRO, L. V. S., MORETO, C. P. N., XAVIER, R. P., SILVA, M. A. D. Paragenesis and evolution of the hydrothermal Bacuri iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Province (PA). **Brazilian Journal of Geology**, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 73-90. FapUNIFESP (SciELO), 2014.

MELO, G. H. C. **Evolução temporal do depósito de óxido ferro-cobre-ouro de Salobo, Província Carajás**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 99 p, 2014.

MELO, G. H. C. **Contexto geológico e evolução metalogenética do depósito de cobre Bacuri, Província Mineral de Carajás**. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 66 p, 2011.

MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R. P., CARVALHO, E. R., HITZMAN, M. W., JOHNSON, C. A., SOUZA FILHO, C. R., TORRESI, I. 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**, v. 43 (2), 2008a.

MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R. P., HITZMAN, M. W., JULIANI, C., SOUZA FILHO, C. R., CARVALHO, E. R. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 34, p. 317-336, 2008b.

MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R. P., SOUZA FILHO, C. R., AUGUSTO, R. A. Aplicação de isótopos estáveis ao estudo dos padrões de distribuição das zonas de alteração hidrotermal associados ao sistema de óxido de ferro-cobre-ouro Sossego, Província Mineral de Carajás. In: **Congresso Brasileiro de Geoquímica**. Atibaia, Sociedade Brasileira de Geoquímica v. 8, CDROM, 2007.

MORETO, C. P. N., MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R. P., CREASER, R. A., DUFRANE, S. A., MELO, G. H. C., DELINARDO SILVA, M. A., TASSINARI, C. C. G., SATO, K. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajas Province, Brazil. **Mineralium Deposita**, v. 50(5), p. 517-546, 2015a.

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. Neoproterozoic and Paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossego deposit, Carajas Province, Brazil, Re-Os and U-Pb geochronological evidence. **Economic Geology**, v. 110(3), p. 809-835, 2015b.

MORETO, C. P. N. **Geocronologia U-Pb e Re-Os aplicada à evolução metalogenética do Cinturão Sul do Cobre da Província Mineral de Carajás**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UNICAMP, 216 p, 2013.

MORETO, C. P. N., MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R. P., AMARAL, W. S., SANTOS, J. S. S., JULIANI, C., SOUZA FILHO, C. R. Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. **Mineralium Deposita**, v. 46, p. 789–811, 2011.

- MORETO, C. P. N. **O depósito de óxido de ferro-cobre-ouro Bacada, Província Mineral de Carajás, PA: Geocronologia U-Pb das rochas hospedeiras.** Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 85 p, 2010.
- MOUGEOT, R., RESPAUT, J. P., BRIQUEU, L., LEDRU, P., MILESI, J. P., MACAMBIRA, M. J. B., HUHN, S. B. Geochronological constrains for the age of the Águas Claras Formation (Carajás Province, Pará, Brazil): **Congresso Brasileiro de Geologia**, 39th, Salvador, Abstracts, p. 579-581, 1996.
- NEGRÃO, M. M. **Caracterização geológica e metalogenética da ocorrência de Cu-Au (Mo-Co), do Grupo Rio Novo, no contato S-SE com o Granito Cigano, Província Mineral de Carajás.** Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências/UNB, 160 p, 2008.
- NOGUEIRA, A. C. R., TRUCKENBRODT, W., PINHEIRO, R. V. L. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. *Bol. Mus. Par. Em. Goeldi, Ciência da Terra*, v. 7, p. 177-277, 1995.
- OLIVEIRA, C. G., SANTOS, R. V., LAFON, J. M. Variação da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ durante a evolução da zona de cisalhamento aurífera de Diadema, Sudeste do Pará. In: **38 Congresso Brasileiro de Geologia**, Camboriú. Resumos Expandidos, v. 2, p. 415-416, 1994.
- OLIVEIRA, M. A., DALL'AGNOL, R., ALTHOFF, F. J., LEITE, A. A. S. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 27, p. 146-160, 2009.
- OLIVEIRA, M. A., DALL'AGNOL, R., SCAILLET, B. Petrological constraints on crystallization conditions of Mesoarchean Sanukitoid Rocks, southeastern Amazonian craton, Brazil. **Journal of Petrology**, v. 51, p. 2121- 2148, 2010.
- OZ MINERALS. Antas North. **Mineral Resource and Ore Reserve Statement and Explanatory Notes**, 2020.
- Oz Minerals. Pedra Branca. **Mineral Resource and Ore Reserve Statement and Explanatory Notes**, 2022.
- PASSCHIER, C. W., TROUW, R. A. J. **Microtectonics**. Berlin; New York, Springer, 2005.
- PEREIRA, R. M. P. **Geologia da Região Sul da Serra Norte e Características do Minério de Ferro do Depósito N8, Província Mineral de Carajás.** Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências/UFGM, 143 p, 2009.
- PESTILHO, A. L. S., MONTEIRO, L. V. S., MELO, G. H. C., MORETO, C. P. N., JULIANI, C., FALLICK, A. E., XAVIER, R. P. Stable isotopes and fluid inclusion constraints on the fluid evolution in the Bacaba and Castanha iron oxide-copper-gold deposits, Carajás Mineral Province, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 121, 103738, 2020.
- PIDGEON, R. T., MACAMBIRA, M. J. B., LAFON, J. M. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás province, Brazil: Evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. **Chemical Geology**, v. 166, p. 159–171, 2000.

- PIMENTEL, M. M., LINDENMAYER, Z. G., LAUX, J. H., ARMSTRONG, R., ARAÚJO, J.C. Geochronology and Nd geochemistry of the Gameleira Cu–Au deposit, Serra dos Carajás, Brazil: 1.8–1.7 Ga hydrothermal alteration and mineralization. **Journal of South American Earth Science**, v. 15, p. 803-813, 2003.
- PINHEIRO, R. V. L., KADEKARU, K., SOARES, A. V., FREITAS, C., FERREIRA, S. N., MATOS, F. M. V. Carajás, Brazil - a short tectonic review. In: **XIII Simpósio de Geologia da Amazônia**. Belém, p. 1086–1089, 2013.
- PINHEIRO, R. V. L., HOLDSWORTH, R. E. Reactivation of Archean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. **Journal of the Geological Society**, v. 154, p. 99-103, 1997a.
- PINHEIRO, R. V. L., HOLDSWORTH, R. E. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico. Pará. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 597–606, 2000.
- POLLARD, P. J., TAYLOR, R. G., PETERS, L., MATOS, F., FREITAS, C., SABOIA, L., HUHN, S. R. B. 40Ar-39Ar dating of Archean iron oxide Cu-Au and Paleoproterozoic granite-related Cu-Au deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil: implications for genetic models. **Mineralium Deposita**, p. 1–18, 2018.
- POLLARD, P. J. An intrusion-related origin for Cu–Au mineralization in iron oxide–copper–gold (IOCG) provinces. **Mineralium Deposita**, v. 41, p. 179-187, 2006.
- PORTER, T. M. Current understanding of iron oxide associated-alkali altered mineralised systems. Part 1. An overview. In: Porter TM (ed) **Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: A global perspective**. Australian Mineral Foundation, Adelaide, p. 5–32, 2010.
- PREVIATO, M. **Evolução paragenética e regime de fluidos hidrotermais no sistema Borrachudo: Implicações para a metalogênese e cobre na Província Carajás**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 131 p, 2016.
- RAJU, P. V. S., KUMAR, K. S. Magnetic Survey for Iron-Oxide-Copper-Gold (IOCG) and Alkali Calcic Alteration Signatures in Gadawara, M.P, India: Implications on Copper Metallogeny. **Minerals**, 10, 671, 2020.
- REAL, I., JOHN, F. H. T., CARRIEDO, J. Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile, **Ore Geology Reviews**, v. 102, p. 106-153, 2018.
- REED, M. H. Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition. In: Barnes H.L. (ed.), **Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits**, Wiley, New York, p. 303–365, 1997.
- REID, A. The Olympic Cu-Au Province, Gawler Craton: A Review of the Lithospheric Architecture, Geodynamic Setting, Alteration Systems, Cover Successions and Prospectivity. **Minerals**, 9, 371, 2019.

RÉQUIA, K., STEIN, H., FONTBOTÉ, L., CHIARADIA, M. Re–Os and Pb–Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. **Mineralium Deposita**, v. 38, p. 727–738, 2003.

RIGON, J. C., MUNARO, P., SANTOS, L. A., NASCIMENTO, J. A. S., BARREIRA, C. F. Alvo 118 copper–gold deposit: geology and mineralization, Serra dos Carajás, Pará, Brazil. **31st International Geological Congress**, Rio de Janeiro. SBG, Abstract Volume, [CD-ROM], 2000.

RIMSTIDT, J. D. Gangue mineral transport and deposition. In: Barnes H.L. (ed.), **Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits**, 3rd ed., New York, Wiley, p. 435–487, 1997.

ROBERTS, D. E., HUDSON, G. R. T. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia. **Economic geology**, v. 78, p. 799–822, 1983.

RODRIGUEZ-MUSTAFA, M. A., SIMON, A. C., REAL, I., THOMPSON, J. F. H., BILENKER, L. D., BARRA, F., BINDEMAN, I., CADWELL, D. A Continuum from Iron Oxide Copper-Gold to Iron Oxide-Apatite Deposits: evidence from Fe and O stable isotopes and trace element chemistry of magnetite. **Economic Geology**, [S.L.], v. 115 (7), p. 1443–1459, 2020.

Santos, J. O. S. **Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central**, in Bizzi, L.A., ed, **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG**. Brasília, CPRM, p. 169-226, 2003.

SARDINHA, A. S., BARROS, C. E. M., KRYMSKY, R. Geology, geochemistry, and U-Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 20, p. 327–339, 2006.

SCHETSELAAR, E., AMES, D., GRUNSKY, E. Integrated 3D Geological Modeling to Gain Insight in the Effects of Hydrothermal Alteration on Post-Ore Deformation Style and Strain Localization in the Flin Flon Volcanogenic Massive Sulfide Ore System. **Minerals**, v. 8 (3), 2018.

SCHETSELAAR, E., PEHRSSON, S., DEVINE, C., LAFRANCE, B., WHITE, D., MALINOWSKI, M. 3-D geologic modeling in the Flin Flon mining district, Trans-Hudson orogen, Canada: Evidence for polyphase imbrication of the Flin Flon-777-Callinan volcanogenic massive sulfide ore system. **Economic Geology**, v. 111, p. 877–901, 2016.

SCHLEGEL, T., HEINRICH, C. A. Lithology and hydrothermal alteration control the distribution of copper grade in the Prominent Hill iron oxide-copper-gold deposit (Gawler Craton, South Australia). **Economic Geology**, v. 110, p. 1953–1994, 2015.

SCHUTESKY, M. A., OLIVEIRA, C. G. From the roots to the roof: An integrated model for the Neoproterozoic Carajás IOCG System, Brazil, **Ore Geology Reviews**, v. 127, 2020.

SCHWARZ, M., FRANTZ, J. C. Depósito de Cu-Zn Pojuca Corpo Quatro: IOCG ou VMS?. **Pesquisas em Geociências**, v. 40, p. 05-19, 2013.

SIMON, A. C., KNIPPING, J., REICH, M., BARRA, F., DEDITIUS, A. P., BILENKER, L., CHILDRESS, T. Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) and iron oxide copper-gold (IOCG) deposits form by a combination of igneous and magmatic-hydrothermal processes: Evidence from the Chilean iron belt: **Society of Economic Geologists, Special Publication**, v. 21, p. 89–114, 2018.

SHIMIZU, V. K. **Classificação e caracterização de tipos de minério de cobre da Mina do Sossego – Região de Carajás**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, 121 p, 2012.

SIEPIERSKI, L. **Geologia, petrologia e potencial para mineralizações magmáticas dos corpos máficoultramáficos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás, Brasil**. PhD Thesis, Universidade de Brasília, 2016.

SILLITOE, R. H. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. **Mineralium Deposita**, v. 38(7), p. 787–812, 2003.

SILVA, C. M. G., VILLAS, R. N. The Águas Claras Cu-sulfide ± Au deposit, Carajás region, Pará, Brazil: geological setting, wall-rock alteration and mineralizing fluids. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, p. 315–326, 1998.

SILVA, M. A. D. **Metatexitos e diatexitos do Complexo Xingu na região de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução mesoarqueana do Domínio Carajás**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SKARMETA, J., 2020. Structural Controls on Alteration Stages at the Chuquicamata Copper-Molybdenum Deposit, Northern Chile. **Economic Geology**, v. 116 (1), p. 1–28, 2020.

SKIRROW, R. G., 2022. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification. **Ore Geology Reviews**, v. 140, 2022.

SKIRROW, R. G., MURR, J., SCHOFIELD, A., HUSTON, D. L., VAN DER WIELEN, S., CZARNOTA, K., COGHLAN, R., HIGHET, L. M., CONNOLLY, D., DOUBLIER, M., DUAN, J. Mapping iron oxide Cu-Au (IOCG) mineral potential in Australia using a knowledge-driven mineral systems-based approach. **Ore Geology Reviews**, v. 113, 2019.

SKIRROW, R. G., WALSH, J. L. Reduced and oxidized Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek Inlier, Australia: An integrated geologic and chemical model. **Economic Geology**, v. 97(6), 2002.

SOUSA, M. J. **Análise regional de múltiplas variáveis à discriminação de sistemas mineralizantes da Província Mineral de Carajás – PA**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências/UNB, 100 p, 2019.

SOUZA, S. R. B., MACAMBIRA, M. J. B., SHELLER, T. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúnas (Serra dos Carajás, PA); implicações estratigráficas. In: **5º Simpósio de Geologia da Amazônia**. Belém, p. 380-383, 1996.

- SUN, T., XU, Y., YU, X., LIU, W., LI, R., HU, Z., WANG, Y. Structural Controls on Copper Mineralization in the Tongling Ore District, Eastern China: Evidence from Spatial Analysis. **Minerals**, 8, 2018.
- TALLARICO, F. H. B., FIGUEIREDO, B. R., GROVES, D. I., KOSITCIN, N., MCNAUGHTON, N. J., FLETCHER, I. R., REGO, J. L. 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**, v. 100th Anni, p. 7–28, 2005.
- TALLARICO, F. H. B., MCNAUGHTON, N. J., GROVES, D. I., FLETCHER, I. R., FIGUEIREDO, B. R., CARVALHO, J. B., REGO, J. L., NUNES, A. R. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. **Mineralium Deposita**, v 39, p. 68–86, 2004.
- TALLARICO, F. H. B. **O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, 229 p, 2003.
- TASSINARI, C. C. G., MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22(3), p. 174-182, 1999.
- TAVARES, F. M., TROUW, R. A. J., SILVA, C. M. G., JUSTO, A. P., OLIVEIRA, J. K. M. The multistage tectonic evolution of the northeastern Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil: Revealing complex structural patterns, **Journal of South American Earth Sciences**, v. 88, p. 238-252, 2018.
- TAVARES, F. M. **Evolução Geotectônica do Nordeste da Província Carajás**. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências/UFRJ, 143 p, 2015.
- TAZAVA, E., OLIVEIRA, C. G. The igarapé Bahia Au-Cu-(REE-U) deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. In: Porter, T.M. (eds.) **Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective**. Australian Mineral Foundation, Adelaide, p. 203–212, 2000.
- TEIXEIRA, N. A., CAMPOS, L. D., PAULA, R. R., LACASSE, C. M., GANADE, C. E., MONTEIRO, C. F., LOPES, L. B. L., OLIVEIRA, C. G. Carajás Mineral Province - Example of metallogeny of a rift above a cratonic lithospheric keel: **Journal of South American Earth Sciences**, 2020.
- TEIXEIRA, A. S., FERREIRA FILHO, C. F., GIUSTINA, M. E. S. D., ARAUJO, S. M., SILVA, H. H. A. B. Geology, petrology and geochronology of the Lago Grande layered complex: Evidence for a PGE-mineralized magmatic suite in the Carajás Mineral Province, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 64, p. 116-138, 2015.
- TEIXEIRA, W., HAMILTON, M. A., GIRARDI, V. A. V., FALEIROS, F. M., ERNST, R. E. U-Pb baddeleyite ages of key dyke swarms in the Amazonian Craton (Carajás/Rio Maria and Rio Apa areas): Tectonic implications for events at 1880, 1110 Ma, 535 Ma and 200 Ma. **Precambrian Research**, v. 329, p. 138-155, 2019.

- TORRESI, I., BORTHOLOTO, D. F. A., XAVIER, R. P., MONTEIRO, L. V. S. 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**, v. 47, p. 299-323, 2012.
- TRENDALL, A. F., BASEI, M. A. S., DE LAETER, J. R., NELSON, D. R. SHRIMP U-Pb constraints on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 11, p. 265-277, 1998.
- VALADÃO, L. V. **Minealogia e relação textural e microestrutural do minério tipo IOCG da mina do Salobo, Província Mineral de Carajás: revisão da sequência paragenética**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências/UNB, 60 p, 2019.
- Vale. **Formulário de Relatório Annual 20-F**; Comissão de Valores Mobiliários dos Estados Unidos, 2022.
- VANKO, D. A., BISHOP, F. C. Occurrence and origin of marialitic scapolite in the Humboldt Lopolith, N.W. Nevada. **Contributions to Mineralogy Petrology**, v. 81, p. 277-289, 1982.
- VASQUEZ, L. V., ROSA-COSTA, L. R., SILVA, C. G., RICCI, P. F., BARBOSA, J. O., KLEIN, E. L., LOPES, E. S., MACAMBIRA, E. B., CHAVES, C. L., CARVALHO, J. M., OLIVEIRA, J. G., ANJOS, G. C., SILVA, H. R. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas–SIG: Texto Explicativo dos Mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000**. Belem: CPRM, 2008.
- VOLLGGER, S. A., CRUDEN, A. R., AILLERES, L., COWAN, E. J. Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia, **Ore Geology Reviews**, v. 69, p. 268-284, 2015.
- VOLP, K. M. The Estrela copper deposit, Carajás, Brazil. Geology and implications of a Proterozoic copper stockwork. In: Mao J, Bierlein FP (eds) **Mineral deposit research: meeting the global challenge**. Springer, Berlin, p. 1085–1088, 2005.
- WANG, G., PANG, Z., BOISVERT, J., HAO, Y., CAO, Y., QU, J. Quantitative assessment of mineral resources by combining geostatistics and fractal methods in the Tongshan porphyry Cu deposit (China). **Journal of Geochemical Exploration**, v. 134, p. 85–98, 2013.
- WELLMANN, F., CAUMON, G. Chapter One - 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties, Editor(s): Cedric Schmelzbach, **Advances in Geophysics**, Elsevier, v. 59, p. 1-121, 2018.
- WILLIAMS, P. J., KENDRICK, M. A., XAVIER, R. P. Sources of Ore Fluid Components in IOCG Deposits; in Porter, T.M., (ed.), **Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective**, v. 3 - **Advances in the Understanding of IOCG Deposits**; PGC Publishing, Adelaide, 2010.

WILLIAMS, P. J., BARTON, M. D., JOHNSON, D. A., FONTBOTÉ, L., DE HALLER, A., MARK, G., OLIVER, N. H. S., MARSCHIK, R. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distributions and possible modes of origin. **Economic Geology**, v. 100, p. 371–405, 2005.

WILLIAMS, P. J., SKIRROW, R. G. Overview of iron oxide-copper-gold deposits in the Curnamona Province and Cloncurry district (Mount Isa Block), Australia. In T. M. Porter (Ed.), **Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective**, Australian Mineral Foundation, v. 1, p. 105–122, 2000.

WINTER, C. J. **Geology and base-metal mineralization associated with Archean iron-formation in the Pojuca Corpo Quatro Deposit, Carajás, Brazil**. University of Southampton, 1994.

WIRTH, K. R., GIBBS, A. K., OLSZEWSKI, W. J. Jr. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará Group and Serra dos Carajás granite, Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, p. 195-200, 1986.

XAVIER, R. P., MONTEIRO, L. V. S., SOUZA FILHO, C. R., TORRESI, I., CARVALHO, E. R., DREHER, A. M., WIEDENBECK, M., TRUMBULL, R. B., PESTILHO, A. L. S., MORETO, C. P. N. The iron oxide copper– gold deposits of the Carajás Mineral Province, Brazil: an updated and critical review. In: Porter TM (ed) **Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective**. Australian Mineral Foundation, Adelaide, v. 3, p. 285-306, 2010.

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., SILVA, F. H. F. The 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**, 2012.

XAVIER, R. P., MORETO, C. P. N., MELO, G. H., TOLEDO, P., HUNGER, R., DELINARDO DA SILVA, M. A., FAUSTINONI, J., LOPES, A., MONTEIRO, L. V. S., PREVIATO, M., JESUS, S. S. Geology and metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic copper systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil. In: **Proceedings of the 14th Biennial SGA Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits**, Quebec, p. 899-902, 2017.

ZUCCHETTI, M. **Rochas máficas do Grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA**. Tese de Doutorado, UFMG, 165p, 2007.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E MODELAGEM 3D DA MINA ANTAS NORTE, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, BRASIL

RESUMO

A mina Antas Norte está localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico, na Província Mineral de Carajás. O corpo de minério encontra-se ao longo de uma zona de cisalhamento secundária NE-SW e é hospedado pelas rochas metavulcânicas máficas e félsicas do Supergrupo Itacaiúnas que foram, em quase sua totalidade, modificadas pelas alterações. O trabalho de campo e os dados petrográficos permitiram reconhecer uma associação de alterações hidrotermais que iniciou com a alteração sódica (albita) e foi seguida por alterações potássica (biotita + escapolita), cálcica (anfíbólio + apatita), silicificação (quartzo) e, finalmente, propilitica (clorita + epidoto + calcita). As rochas metavulcânicas foram alteradas sob regimes deformacionais que passaram de dúctil-frágil a frágil. Estando associada à alteração cálcica e ocorrendo de forma maciça, brechada ou em veios e vênulas, a mineralização do depósito produziu uma associação de minério composta principalmente por calcopirita, pirrotita e pirita, tendo como fase acessória ilmenita, esfalerita e pentlandita. Essas associações de alterações e minérios indicam que o sistema hidrotermal evoluiu com diminuição da temperatura, da salinidade e do pH. Diferente dos outros depósitos que ocorrem em Carajás, Antas Norte não apresenta a fase de óxido de ferro, apenas sulfetos de ferro. Diante desse fato, a melhor classificação para ele seria ISCG (Iron sulfide copper-gold), um subtipo do grande grupo IOCG (Iron oxide copper-gold). Um modelo 3D das diferentes alterações e da mineralização foi gerado usando dados de 157 furos de sondagem e 18 seções. O modelo revelou a importância da zona de cisalhamento para a formação do depósito, como também a geometria dos corpos. O corpo mineralizado tem forma tabular subvertical, podendo chegar até 350 metros de comprimento ao longo do strike, 200 metros de comprimento em profundidade e 35 metros de largura. O modelo foi responsável também por mostrar que a mineralização continua aberta em profundidade, porém, necessitando de um volume maior de dados para seu detalhamento.

Palavras-chave: Depósito ISCG; Cobre; Carajás; Modelagem Geológica.

INTRODUÇÃO

A Província Carajás, localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico no Estado do Pará, hoje representa a principal província mineral do país e uma das mais importantes do mundo (Santos, 2003). Esta província destaca-se por apresentar depósitos gigantes de ferro de alto teor, manganês, platinóides, níquel e a maior quantidade conhecida de depósitos IOCG (Iron Oxide Copper-Gold; Hitzman et al. 1992) do mundo (Hühn & Nascimento 1997; Tallarico et al. 2005; Groves et al. 2010; Xavier et al. 2010; Pollard et al. 2018). Este cenário particularmente próspero decorre da evolução geológico-metalogenética da Província Carajás durante o Arqueano-Paleoproterozoico, que envolveu diversas bases e eventos de mineralização de metais preciosos em ambientes geotectônicos distintos (Grainger et al. 2008).

O grupo diversificado de depósitos óxidos de ferro cobre-ouro (IOCG) tem sido uma das classes mais controversas de depósitos de minério desde o seu reconhecimento como um novo tipo. No centro dos debates estão as questões de definição, classificação, os papéis das fontes magmáticas e não magmáticas de fluidos, fontes dos metais e configurações tectônicas. Apesar dos grandes esforços para esclarecer e restringir a definição de depósitos IOCG e entender suas configurações (Hitzman et al. 1992; Sillitoe, 2003; Williams et al. 2005; Corriveau, 2007; Groves et al. 2010; Barton, 2013), ainda existem questões conflitantes.

Algumas dessas questões decorrem do próprio nome IOCG, que descreve a mineralogia (óxido de ferro) associada aos principais minérios (cobre, ouro) nos depósitos. Como consequência, depósitos de origens, provavelmente, diferentes (por exemplo, fluidos magmáticos-hidrotermais versus não magmáticos ou fontes metálicas) foram incluídos por alguns pesquisadores no grupo de depósitos IOCG. Também problemática tem sido a variação nas definições dos teores exigidos de cobre e ouro para se qualificar como depósitos IOCG. Vários pesquisadores propuseram definições amplas, de modo que alguns depósitos ricos em óxido de ferro com pouco ou nenhum cobre ou ouro são considerados parte da 'família' IOCG como possíveis “membros finais” ou como depósitos “afiliados” (por exemplo, Hitzman et al. 1992; Williams et al. 2005; Corriveau, 2007; Barton, 2013).

Neste cenário, os depósitos de óxido de ferro cobre-ouro (IOCG) de Carajás representam um importante alvo para a indústria mineral. Os principais depósitos de IOCG em Carajás são Salobo (745,9 Mt @ 0,53% Cu e 0,26g/t Au; Vale, 2022), Cristalino (500 Mt @ 1,0% Cu e 0,3g/t Au; Hühn et al. 1999a), Igarapé Bahia/Alemão (219 Mt @ 1,4% Cu e 0,86g/t Au; Tallarico et al. 2005), Sossego (345,6 Mt @ 0,80% Cu e 0,11g/t Au; Vale, 2022), Alvo 118 (170 Mt @ 1,0% Cu e 0,3g/t Au; Rigon et al. 2000), Pedra Branca (18 Mt @ 1.6% Cu e 0.41

g/t Au; Oz Minerals, 2022) e outros depósitos menores (Castanha, Bacaba, Visconde, Jatobá e Bacuri) .

A mina Antas Norte (1.9 Mt @ 0.7 % Cu e 0.2 g/t Au; Oz Minerals, 2020), operada pela Oz Minerals, está localizada na Província Mineral de Carajás (PMC), situada acerca de 25 quilômetros da cidade de Parauapebas. Diferente das outras minas e depósitos de Cu-Au que estão localizadas nos chamados “corredores norte e sul do cobre”, Antas Norte está na porção central. Apesar de sua proximidade com outros depósitos e sua importância econômica, a configuração geológica do depósito é pouco conhecida, especialmente a natureza de suas rochas hospedeiras, o conjunto de alterações hidrotermais, a mineralização e suas relações geométricas. Uma evolução paragenética similar, marcada por estágios subsequentes de alteração sódica, potássica, cálcica seguida por mineralização cupro-aurífero, é reconhecida em outros depósitos localizados na PMC, o que sugere a atuação de processos genéticos semelhantes.

Assim sendo, este trabalho reúne os resultados das análises petrográficas, onde permitiram delinear uma sequência paragenética consistente e o zoneamento espacial e temporal das alterações hidrotermais e da mineralização, bem como porções dos protólitos que resistiram as alterações. Foram realizadas também análises estruturais e modelagem 3D, resultando nos tipos de deformação e na caracterização geométrica das alterações e da mineralização, onde as mesmas deverão acrescentar informações importantes no entendimento e na consolidação de premissas que caracterizam as mineralizações na região.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Mineral de Carajás (PMC) está localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico (Fig. 1A). Constituinto uma das maiores e mais bem preservadas áreas cratônicas arqueanas do mundo, representa atualmente uma das mais importantes províncias minerais do mundo, dado o seu diversificado potencial metalogenético. Essa província é dividida em dois blocos tectônicos (Fig. 1B): o Domínio Rio Maria, a sul, e o Domínio Carajás (Fig. 1C), a norte (Santos 2003; Vasquez et al. 2008), separados por uma zona de cisalhamento regional E-W. Sendo o Domínio Carajás o que possui maior ocorrências de depósitos minerais.

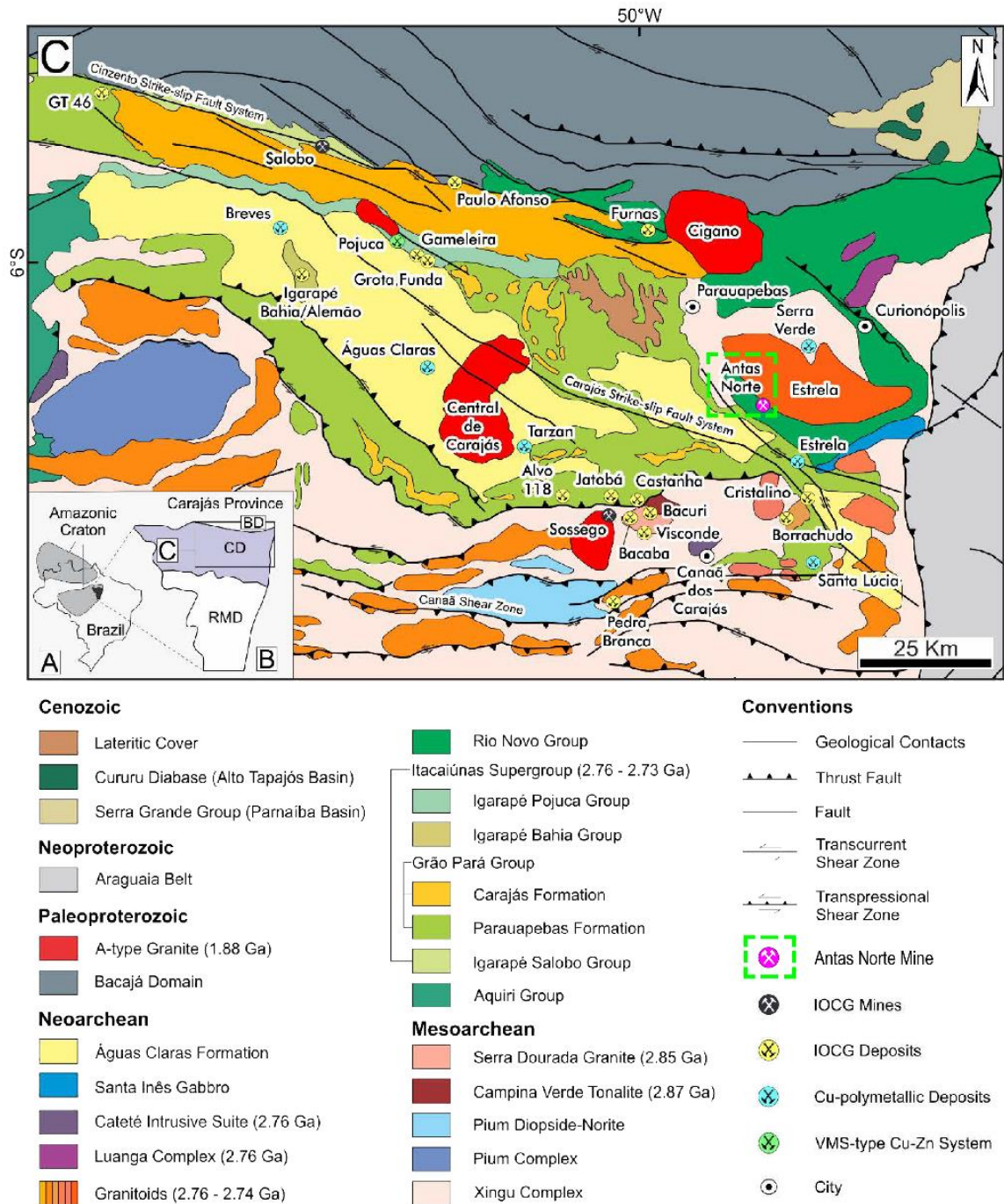


Figura 1: (A) Localização da Província Carajás (preto) no Cráton Amazônico (cinza claro). (B) Compartimentação da Província Carajás nos domínios Rio Maria (sul) e Carajás (norte). (C) Mapa geológico simplificado do Domínio Carajás, indicando a localização dos principais depósitos cupríferos e estruturas (Modificada de Vasquez et al. 2008).

O Domínio Carajás caracteriza-se por embasamento mesoarqueano, seqüências supracrustais neoarqueanas e, intrusivas neoarqueanas e paleoproterozoicas. As rochas do embasamento são representadas pelos complexos Xingu e Pium, cujas rochas foram afetadas por metamorfismo de médio a alto grau em aproximadamente 2,85 Ga (Machado et al. 1991; Pidgeon et al. 2000; Pollard et al. 2018). O Complexo Xingu é composto por ortognaisses tonalíticos, trondhjemíticos, granodioríticos e migmatitos (Hirata et al. 1982; Vasquez et al.

2008), com idade de cristalização do protólito de $3066 \pm 6,6$ Ma (Silva 2014). O Complexo Pium é composto por ortogranulitos charnockíticos a enderbíticos e máficos (Vasquez et al. 2008) com idade de cristalização do protólito em 3002 ± 14 Ma (Pidgeon et al. 2000). Contudo, estudos recentes permitiram a individualização de novas unidades que originalmente eram atribuídas ao Complexo Xingu, mas que são formadas por diferentes tipos de granitóides (Moreto et al. 2011, 2015a, b; Feio et al. 2012, 2013).

As sequências metavulcanossedimentares do Grupo Rio Novo (Hirata et al. 1982) e do Supergrupo Itacaiúnas (Wirth et al. 1986; Machado et al. 1991; DOCEGEO 1988), bem como as coberturas sedimentares da Formação Águas Claras (Araújo et al. 1988; Nogueira et al. 1995), representam as principais unidades supracrustais desse domínio.

O Grupo Rio Novo aflora na região do depósito de Serra Pelada, na porção nordeste do Domínio Carajás (Vasquez et al. 2008). É constituído por rochas metamáficas, metaultramáficas, quartzitos, formações ferríferas bandadas e filitos sericíticos (Hirata et al. 1982; Araújo e Maia 1991; Oliveira et al. 1994).

O Supergrupo Itacaiúnas foi dividido por DOCEGEO (1988) em unidades aproximadamente cronocorrelatas, representadas pelos grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará, e Igarapé Bahia.

O Grupo Igarapé Salobo (Machado et al. 1991), onde observam-se as mineralizações do depósito de Salobo, é constituído por gnaisses, anfibolitos, quartzitos, metagrauvacas e formações ferríferas. O Grupo Igarapé Pojuca, onde ocorre os depósitos Gameleira (Huhn e Nascimento 1997) e Pojuca (DOCEGEO 1988) é composto por rochas metavulcânicas básico-intermediárias intercaladas com rochas metassedimentares psamo-pelíticas e formações ferríferas bandadas (Winter 1994; Lindenmayer et al. 2001b). O Grupo Grão Pará (Wirth et al. 1986; Machado et al. 1991; Trendall et al. 1998), responsável por hospedar a mineralização de Ferro de Carajás, é constituído por metabasaltos, metarriolitos, quartzitos, conglomerados, dolomitos e formações ferríferas bandadas jaspilíticas (DOCEGEO 1988; Zucchetti 2007). O Grupo Igarapé Bahia (Tallarico et al. 2005) tem sua ocorrência bastante restrita à área de ocorrência do depósito Igarapé Bahia/Alemão, sendo constituído por rochas metassedimentares, metavulcânicas máficas, metapiroclásticas e formações ferríferas (DOCEGEO 1988).

A Formação Águas Claras, definindo uma inconformidade angular, sobrepõe-se às sequências metavulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas. É composta por rochas

siliciclásticas incluindo metaconglomerados, quartzitos, mármore, filito carbonoso e sericita quartzitos interpretados como depositados em ambiente de sedimentação fluvial a marinho raso (Nogueira et al. 1995).

As intrusões máfica-ultramáficas acamadadas que ocorrem no Domínio Carajás, de forma geral, são compostos por peridotitos, gabros e noritos associados à suíte magmática Serra Leste (Ferreira Filho et al. 2007) e à suíte intrusiva Cateté (Macambira e Ferreira Filho 2002). Complexos acamadados são representados pelo complexo Luanga (Machado et al. 1991; Mansur e Ferreira Filho 2016), Lago Grande (Teixeira et al. 2015), Serra do Onça e Serra do Puma (Macambira e Ferreira Filho 2002, 2005) e Vermelho (Siepierski 2016). Corpos máficos, como o gabro Santa Inês (DOCEGEO 1988) e o diopsídio norito Pium (Feio et al. 2012) também fazem parte das intrusões. Mineralizações de níquel, cromo e EGP ocorrem associadas aos corpos máfico-ultramáficos (Ferreira Filho et al. 2007; Mansur et al. 2020).

O magmatismo granítico no Domínio Carajás pode ser definido por três eventos principais. O primeiro deles, com idade entre 2,76 e 2,73 Ga, é representado pela formação de granitos alcalinos à metaluminosos, similares aos do tipo-A, que compreendem o Complexo Granítico Estrela (Barros et al. 1997) e os granitos Plaquê (Araújo et al. 1988), Planalto (Huhn et al. 1999a; Feio et al. 2012), Serra do Rabo (Sardinha et al. 2006) e Igarapé Gelado (Avelar et al. 1999; Barros et al. 2004; Sardinha et al. 2006). O segundo, com idade de 2.57 Ga, é caracterizado por intrusões graníticas peralcalinas a metaluminosas nas proximidades da Zona de Cisalhamento Cinzento, representados pelos corpos graníticos Old Salobo e Itacaiúnas (Machado et al. 1991; Souza et al. 1996). O terceiro, em 1.88 Ga, compreende os granitos alcalinos a subalcalinos do tipo-A Central de Carajás, Young Salobo, Cigano, Pojuca e Breves (Machado et al. 1991; Lindenmayer e Teixeira 1999). Enxames de diques máficos recortam os corpos graníticos (Teixeira et al. 2019).

A estruturação geral do Domínio Carajás é marcada por três principais sistemas de cisalhamento WNW-ESE: Carajás e Cinzento, ao norte, e Canaã ao sul (Pinheiro et al. 2013). A foliação E-W amplamente reconhecida no Domínio Carajás e os dobramentos e falhamentos teriam sido causados por encurtamento com vetor NNW para SSW. De acordo com Pinheiro et al. (2013), o formato sigmoidal (“S-shape”) característico desse domínio é atribuído a um sistema de falhas sinistrais NE-SW, análogas a estruturas do tipo-R. Notavelmente, a PMC apresenta uma sucessão de intrusões ígneas e eventos extensionais de caráter transpressivo e transtensional (Pinheiro e Holdsworth, 1997a; Pinheiro e Holdsworth, 2000), demonstrando uma complexa evolução tectônica do Arqueano ao Paleoproterozoico.

DEPÓSITOS DE ÓXIDO DE FERRO COBRE-OURO (IOCG) NA PROVÍNCIA CARAJÁS

A classe de depósitos IOCG representa mundialmente um dos grandes alvos da pesquisa mineral, desde a descoberta do depósito de Olympic Dam na Austrália (Roberts & Hudson, 1983), por apresentar reservas e teores significativos de Cu, além de enriquecimento polimetálico que inclui Au, Ag, U, ETR, Co, Ni, Pd, Nb e P. No entanto, apesar do grande número de estudos realizados nesses depósitos, ainda não há um modelo genético consensual, uma vez que a diversidade de características dos depósitos IOCG relativas aos seus ambientes geotectônicos de formação, idades, rochas hospedeiras e tipos de alterações hidrotermais sugerem que distintos processos geológicos poderiam ter sido responsáveis pela gênese dos depósitos (Hitzman, 2000; Williams et al. 2005). Haynes (2000) ainda descreve depósitos de Cu-Au pobres em óxidos de ferro, porém, que ocorrem nas mesmas províncias metalogênicas que os depósitos IOCG. Eles são comumente ricos em sulfetos de Fe e foram denominados como depósitos de sulfetos de ferro cobre-ouro (Iron Sulfide Copper-Gold ou ISCG).

A Província Mineral de Carajás apresenta a maior concentração conhecida de depósitos de óxido de Fe Cu-Au (IOCG; Hitzman et al. 1992) de classe mundial (Monteiro et al. 2008a), tais como: Salobo (745,9 Mt @ 0,53% Cu e 0,26g/t Au.; Vale, 2022), Cristalino (500 Mt @ 1,0% Cu e 0,3g/t Au; Hühn et al. 1999a), Igarapé Bahia/Alemão (219 Mt 1,4% Cu e 0,86g/t Au; Tallarico et al. 2005), Sossego (345,6 Mt @ 0.80% Cu e 0.11g/t Au; Vale, 2022) e Alvo 118 (170 Mt @ 1,0% Cu e 0,3g/t Au, Rigon 2000). Há ainda outros importantes alvos de pesquisa de Cu-Au tanto no setor norte quanto no setor sul do Domínio Carajás, por exemplo: Igarapé Cinzento/GT46, Furnas, Paulo Alfonso, Castanha, Bacaba, Bacuri, Jatobá, Visconde e Borrachudo. A vinculação dos depósitos cupro-auríferos da Província Carajás com a classe dos depósitos de óxido de ferro cobre-ouro (IOCG) foi proposta primeiramente por Hühn & Nascimento (1997).

As características distintivas nos depósitos IOCG de Carajás, tais como diferentes associações de alteração hidrotermal e de minerais de minério em cada um dos depósitos, parecem refletir a evolução dos sistemas hidrotermais em diferentes níveis crustais com diferentes interações fluido-rocha e fluido-fluido, que podem ainda representar eventos de sobreposição de sistemas hidrotermais. Essas particularidades identificadas em diferentes depósitos resultam da combinação de diversos fatores, tais como: fonte de fluidos, rochas hospedeiras, tipos e distribuição de alterações hidrotermais, influência das estruturas, metamorfismo regional, temperatura, pH e condição redox do fluido (Xavier et al. 2010, 2012).

Contudo, os depósitos de óxido de ferro cobre-ouro de Carajás apresentam algumas similaridades que incluem: (i) rochas hospedeiras variáveis, geralmente, incluindo unidades metavulcanicassedimentares do Supergrupo Itacaiúnas; (ii) forte controle estrutural (associação com zonas de cisalhamento); (iii) proximidade com intrusões de diferentes composições (granito, diorito e gabro); (iv) associação com brechas hidrotermais; (v) intensa alteração hidrotermal; (vi) formação de óxidos de ferro e precipitação de sulfetos; (vii) concentrações significativas de ETR, P, U, Ni, W, Sn, Co e Pd; (viii) um amplo intervalo de temperaturas de homogenização (100 a 570 °C) e salinidades (0 a 69% eq. peso NaCl), indicando a mistura de fluidos de origens diversas que possibilitaram o transporte e deposição dos metais (Monteiro et al. 2008a, Xavier et al. 2012).

Os depósitos localizados no setor norte do Domínio Carajás, próximo ao limite com o Domínio Bacajá, apresentam diferentes características (rochas hospedeiras, tipos e distribuição da alteração hidrotermal, influência das estruturas e metamorfismo regionais) em relação aos depósitos da parte sul. As zonas de alteração hidrotermal dos depósitos do cinturão norte do cobre (Salobo, Grotta Funda, Igarapé Cinzento/GT 46) derivam de processos associados a elevadas temperaturas e condições dúcteis intimamente relacionadas ao desenvolvimento da Zona de Cisalhamento Cinzento (Lindenmayer 2003, Xavier et al. 2017). Tais depósitos mostram zonas de intensa alteração potássica, acompanhadas por significativo enriquecimento em ferro, seguidos por estágios tardios de cloritização (Réquia et al. 2003, Lindenmayer 2003).

Os depósitos do cinturão sul do cobre (Moreto 2013) são localizados na porção sul do Domínio Carajás e concentram-se no contato entre o embasamento e as rochas do Supergrupo Itacaiúnas, no contexto da denominada Zona de Cisalhamento Transcorrente de Canaã (Pinheiro et al. 2013). Esses depósitos exibem evolução paragenética semelhante (alteração sódica, sódica-cálcica, potássica, formação de magnetita, cloritização/epidotização, mineralização cuprífera e sericitização tardia) identificada nos corpos Sequeirinho, Pista e Baiano do depósito de Sossego (Monteiro et al. 2008a), no depósito Cristalino (Craveiro et al. 2019) e em inúmeros outros depósitos e alvos, tais como Castanha, Bacaba, Bacuri, Visconde e Jatobá (Monteiro et al. 2007, Augusto et al. 2008, Craveiro et al. 2012, Melo 2011, Pestilho et al. 2020), o que pode refletir sua colocação em um nível crustal profundo a intermediário. Entretanto, o depósito Alvo 118 (Torresi et al. 2012), assim como o Corpo Sossego do depósito Sossego (Monteiro et al. 2008a, 2008b), apresentam intensa alteração potássica, clorítica e hidrolítica, típicas de sistemas IOCG desenvolvidos em níveis crustais relativamente rasos.

A gênese dos depósitos IOCG de Carajás tem sido relacionada, por alguns autores, aos eventos de granitogênese reconhecidos no Domínio Carajás em: (i) 2,75-2,74 Ga (Hühn et al. 1999b; Galarza et al. 2003); (ii) 2,57 Ga (Réquia et al. 2003; Tallarico et al. 2005; Grainger et al. 2008), e (iii) 1,88 Ga (Pimentel et al. 2003; Tallarico 2003). O evento de 2,57 Ga seria responsável pelo estabelecimento de sistemas magmáticos-hidrotermais regionais (Tallarico et al. 2005, Tavaza & Oliveira 2000, Réquia et al. 2003, Grainger et al. 2008), possibilitando a geração e circulação de fluidos em grande escala. No entanto, Moreto (2013) caracterizou apenas dois eventos hidrotermais nos depósitos IOCG no sul do Domínio Carajás, em 2,7 Ga e 1,88 Ga, o que restringe o evento de 2,57 Ga ao setor norte do Domínio Carajás, especificamente aos depósitos Salobo (Réquia et al. 2003) e Igarapé Bahia (Tallarico et al. 2005).

Na porção norte, as idades da mineralização em Salobo (Re-Os, molibdenita, 2576 ± 8 Ma; Requia et al. 2003) e Igarapé Bahia (Pb-Pb, monazita, 2575 ± 12 Ma; Tallarico et al. 2005) são semelhantes aos 2,57 Ga (U-Pb) em zircão dos granitos Itacaiúnas e Velho Salobo (Machado et al. 1991; Souza et al. 1996). Já na porção sul, Sequeirinho (U-Pb, monazita, 2712 ± 5 Ma; Moreto et al. 2015b) e Pista (Re-Os, molibdenita, 2685 ± 11 Ma e 2710 ± 11 Ma; Moreto et al. 2015b) são semelhantes aos 2,72 Ga (U-Pb) da Suíte do Planalto (Feio et al. 2012).

Depósitos relacionados a granitos de 1.8 Ga, podemos incluir Breves (Tallarico et al. 2004; Botelho et al. 2005), Estrela (Lindenmayer et al. 2005; Volp 2005) e Gameleira (Lindenmayer et al. 2001b; Pimentel et al. 2003; Marschik et al. 2005), onde a mineralização ocorre nas zonas alteradas das cúpulas dos granitos tipo A Paleoproterozoicos, associados a sistemas de veios e brechas ricas em carbonato. Os depósitos Alvo 118 (Torresi et al. 2012), Águas Claras (Silva & Villas 1998), e Sossego-Curral (Monteiro et al. 2008a, 2008b; Moreto et al. 2015a) também parecem estar relacionados aos granitos de 1.8 Ga. Além de sulfetos de Cu-Fe, ouro e abundante quartzo, esses depósitos geralmente contêm uma variedade de B, Be, F, Li, Sn, W e Bi (Pollard et. al. 2018).

METODOLOGIA

Trabalho de Campo, Petrografia e MEV

A etapa de campo foi realizada na área da mina Antas Norte, visando à descrição de 10 testemunhos de sondagem e 9 afloramentos (a partir da realização de mapeamento geológico), a fim de determinar a geometria do depósito, natureza de suas rochas hospedeiras, distribuição e tipos de alteração hidrotermal e o modo de ocorrência da mineralização. Estudos petrográficos

em luz transmitida e refletida foram desenvolvidos no Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará em lâminas delgadas-polidas confeccionadas a partir de 34 amostras dos testemunhos de sondagem. A partir da petrografia foi possível a caracterização detalhada das rochas hospedeiras, os tipos e estilos de alteração hidrotermal e das relações texturais entre a mineralização e as alterações. Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) acopladas a EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) também foram realizadas visando à identificação de fases minerais não reconhecidas ao microscópio óptico como fases minerais acessórias, inclusões minerais ou mesmo elementos traços em minerais de minério.

Modelagem 3D e Dados Estruturais

Este estudo utilizou o Leapfrog Geo 2022 (Seequent - Bentley Company ©) para estabelecer um modelo 3D das alterações hidrotermais e mineralização do depósito Antas Norte, através da modelagem implícita. Neste trabalho, os dados utilizados incluíram mapa geológico e de alteração hidrotermal, levantamento topográfico da cava da mina (MDE – modelo digital de elevação), 18 seções e 157 furos de sondagem totalizando 30.657,55 metros perfurados. Para a construção do modelo, todos os dados foram organizados em um banco de dados único e importados para o Leapfrog Geo. O modelo foi gerado por meio de vetores de contato derivados das seções, dos furos e dos mapas, utilizando os dados topográficos como limitadores de extensão dos corpos. O grande número de dados de furos de sondagem e de seções permitiu validar os objetos geológicos de subsuperfície porque eles foram usados como restrições de profundidade. Os dados estruturais foram analisados a partir dos diagramas de rosetas e da plotagem dos planos e dos polos no software Stereonet versão 9.2.3 (© Richard W. Allmendinger 2013). Ao todo foram utilizadas 57 medidas estruturais, obtidas a partir de medidas de foliação, falhas, fraturas e lineação mineral.

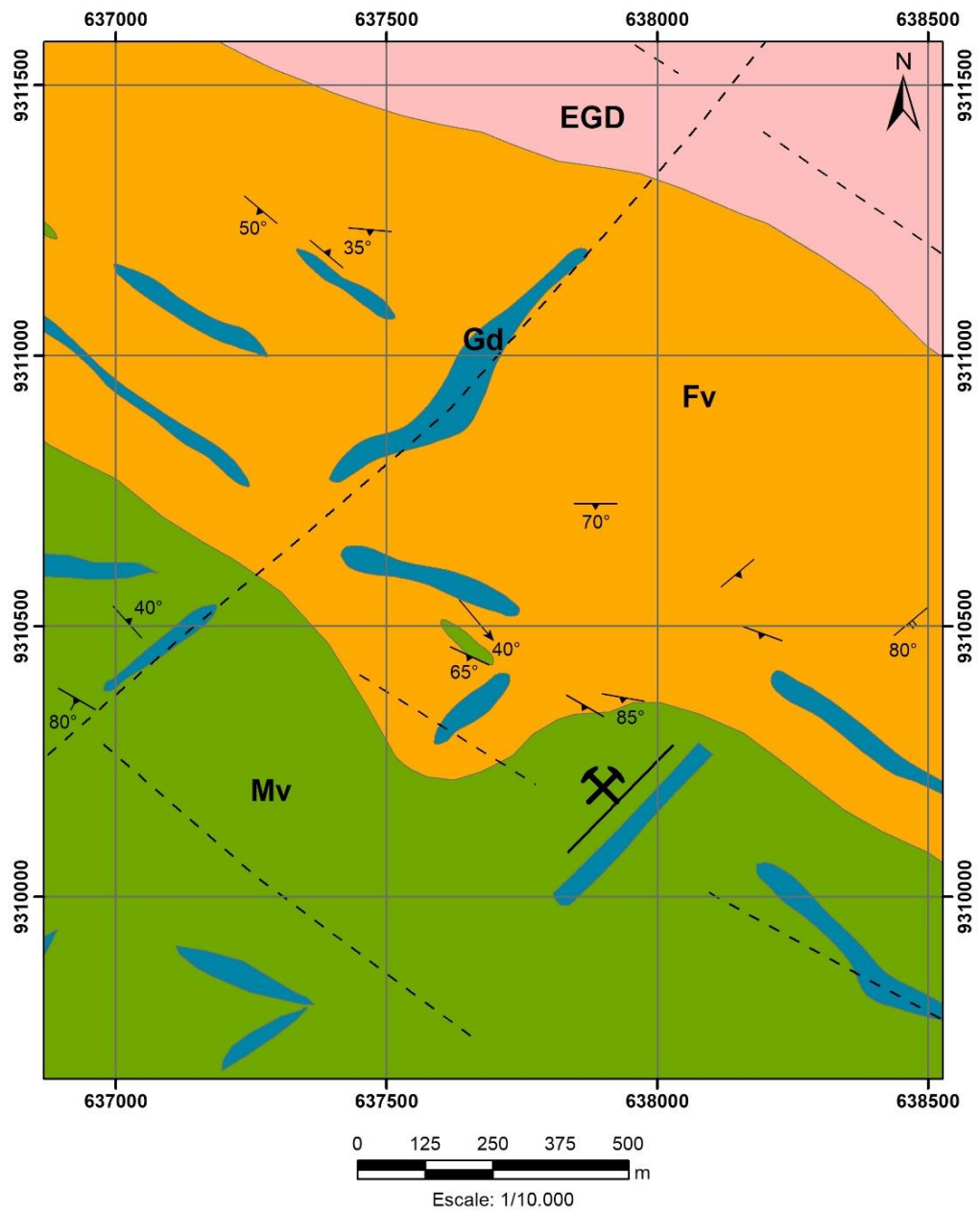
GEOLOGIA LOCAL

Rochas Hospedeiras

O depósito Antas Norte (Fig. 2) está localizada próxima ao Complexo Granítico Estrela e está hospedada nas rochas metavulcânicas máficas e félsicas do Grupo Grão Pará, pertencente ao Supergrupo Itacaiúnas, sendo recortada por diques de gabro. Como um desdobramento das características estruturais regionais (WNW-ESE), principalmente associada à falha Carajás, o corpo de minério está posicionado na direção NE-SW. Essas rochas foram intensamente modificadas e alteradas por fluidos hidrotermais, o que dificulta o reconhecimento da natureza dos seus protólitos em testemunhos de sondagens devido à falta de suas feições primárias que

foram obliteradas. Extensas zonas de alteração hidrotermal resultantes do processo de interação fluido-rocha são reconhecidas na área do depósito.

As rochas vulcânicas máficas (Fig. 3) apresentam granulação fina a média e coloração cinza escuro a verde escuro. Mostram diferentes graus de cisalhamento e alteração hidrotermal que obliteram até 90% de sua assembleia mineralógica original, apresentando foliação milonítica penetrativa (Fig. 3A) na porção mais distal e brechação (Fig. 3B) na porção mais proximal do depósito. Embora tenha sofrido alteração e deformação generalizadas, o reconhecimento de clinopiroxênio (Fig. 3F), k-feldspato (Fig. 3E) e titanita (Fig. 3D) demonstram suas características reliquiárias, sugerindo a composição original dessas rochas. Alterações cálcica e potássica, anfibólios (hornblenda e actinolita) (Fig. 3) e biotita (Fig. 3F), respectivamente, são os principais produtos hidrotermais, que substituíram a maioria dos minerais primários nessas rochas. Apatita (Fig. 3B e 3E), escapolita (Fig. 3F), clorita (Fig. 3D), ilmenita (Fig. 3B e Fig. 3D) e epidoto (Fig. 3E) são minerais de alteração subordinados. Albita (Fig. 3A e 3C), quartzo (Fig. 3A e 3C) e calcopirita (Fig. 3B) também são reconhecidos quando próximo às rochas vulcânicas félsicas e à mineralização.



Legend

Conventions

- Estratification
- Foliation-S1
- Foliation-S2
- Mineral Foliation
- Inferred Faults
- Mineralized shear zone
- Antas Norte open-pit

Lithologies

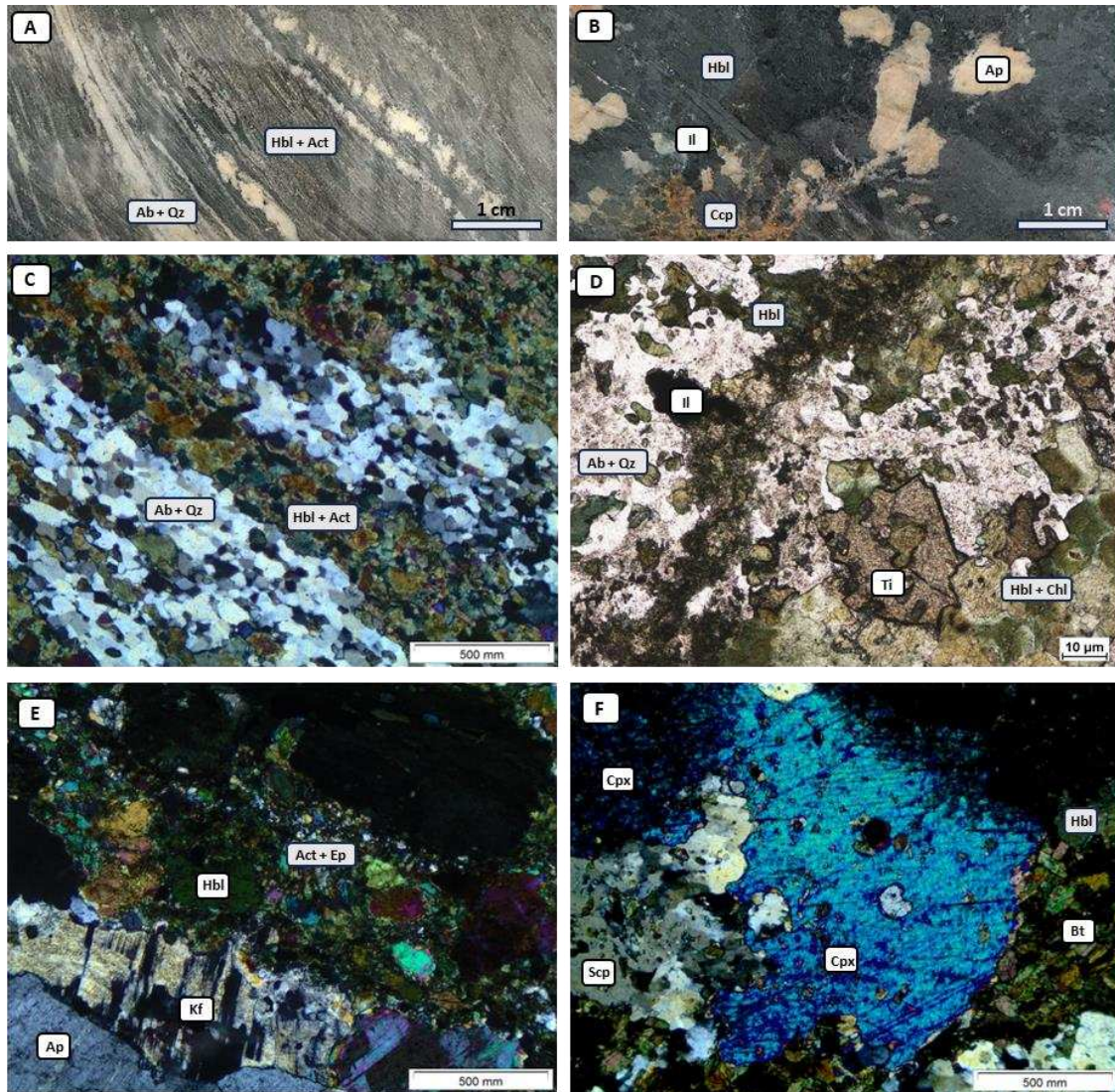
Intrusive Rocks

- Gabbroic Dikes
- Granite Estrela: granites, granodiorites, tonalites

Itacaiúnas Supergroup - Gran Pará Group

- Felcis Volcanic Rocks Domain
- Mafic Volcanic Rocks Domain

Figura 2: Mapa geológico da área da mina Antas Norte (Modificado dos arquivos internos da Oz Minerals).

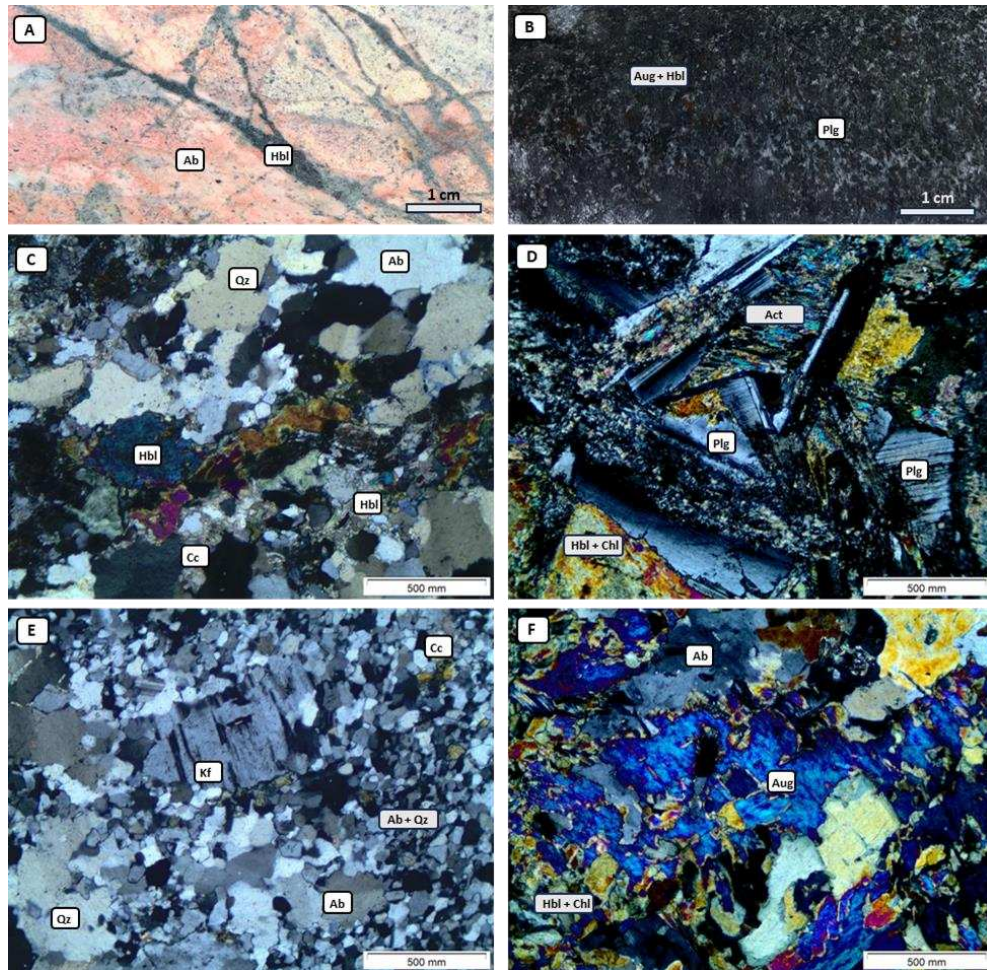


Ab: albita; Act: actinolita; Ap: apatita; Bt: biotita; Ccp: calcopirita; Chl: clorita; Cpx: Clinopiroxênio; Ep: epidoto; Scp: escapolita; Hbl: hornblenda; Il: ilmenita; Kf: k-feldspato; Qz: quartzo; Ttn: titanita; XPL: nicóis cruzados; PPL: nicóis paralelos.

Figura 3: Litotipo máfico da região da mina Antas Norte: (A) Rocha vulcânica máfica da porção distal da mineralização, apresentando-se milonitizada com hornblenda, actinolita, albita e quartzo formando bandamentos. (B) Rocha vulcânica máfica da porção proximal da mineralização, apresentando-se brechada com hornblenda, apatita, ilmenita e calcopirita. (C) Fotomicrografia (luz transmitida – PPL) do bandamento milonítico com as porções máficas (Hbl+Act) e as porções félsicas (Ab+Qz). (D) Fotomicrografia (luz transmitida – PPL) da rocha alterada hidrottermalmente com presença de albita, quartzo, hornblenda, clorita e ilmenita, porém, a titanita apresentando aspecto corroído evidencia seu caráter pretérito à alteração, sendo um mineral ainda do protólito. (E) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da porção proximal da mineralização apresentando-se bastante alterada com presença de apatita, hornblenda, actinolita e epidoto, e k - feldspato sendo consumido. (F) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da intensa alteração sofrida pela rocha com presença de escapolita, biotita e hornblenda, porém, com presença também de clinopiroxênio, sendo este um mineral do protólito antes de sua alteração.

As rochas vulcânicas félsicas (Fig. 4A, 4C e 4E) apresentam granulação fina e coloração cinza claro com tons avermelhados. A brechação mostra-se moderada, sendo a alteração hidrotermal o fator mais relevante para a modificação das rochas. Exibem fenocristais de feldspato (Fig. 4E) e cristais de quartzo (Fig. 4C e 4E) em matriz de grão fino de quartzo (Fig. 4E) e albita (Fig. 4E), cuja associação mineral indica uma composição dacítica. A principal alteração que o litotipo foi exposto é a sódica, tendo a albita como principal produto hidrotermal. Anfibólio (Fig. 4A e 4C) e calcita (Fig. 4C e 4E) ocorrem quando próximo ao contato com as rochas máficas.

Os diques de gabro (Fig. 4B, 4D e 4F), subparalelos à zona de cisalhamento, intrudem os outros tipos litológicos e a mineralização do depósito, e possuem coloração cinza escuro a esverdeado, estrutura maciça e granulação fanerítica média à fina. Quando menos alterados, apresentam relíquias de textura ofítica à subofítica e é composto, principalmente, por plagioclásio (Fig. 4D) e piroxênio (Fig. 4F). Com a intensificação da alteração, minerais como anfíbólio (Fig. 4B, 4D e 4F), albíta (Fig. 4F) e clorita (Fig. 4D e 4F) tornam-se mais comuns.



Ab: albíta; Act: actinolita; Aug: augita; Cc: calcita; Chl: clorita; Hbl: hornblenda; Kf: k-feldspato; Qz: quartzo; Plg: plagioclásio; XPL: nicóis cruzados.

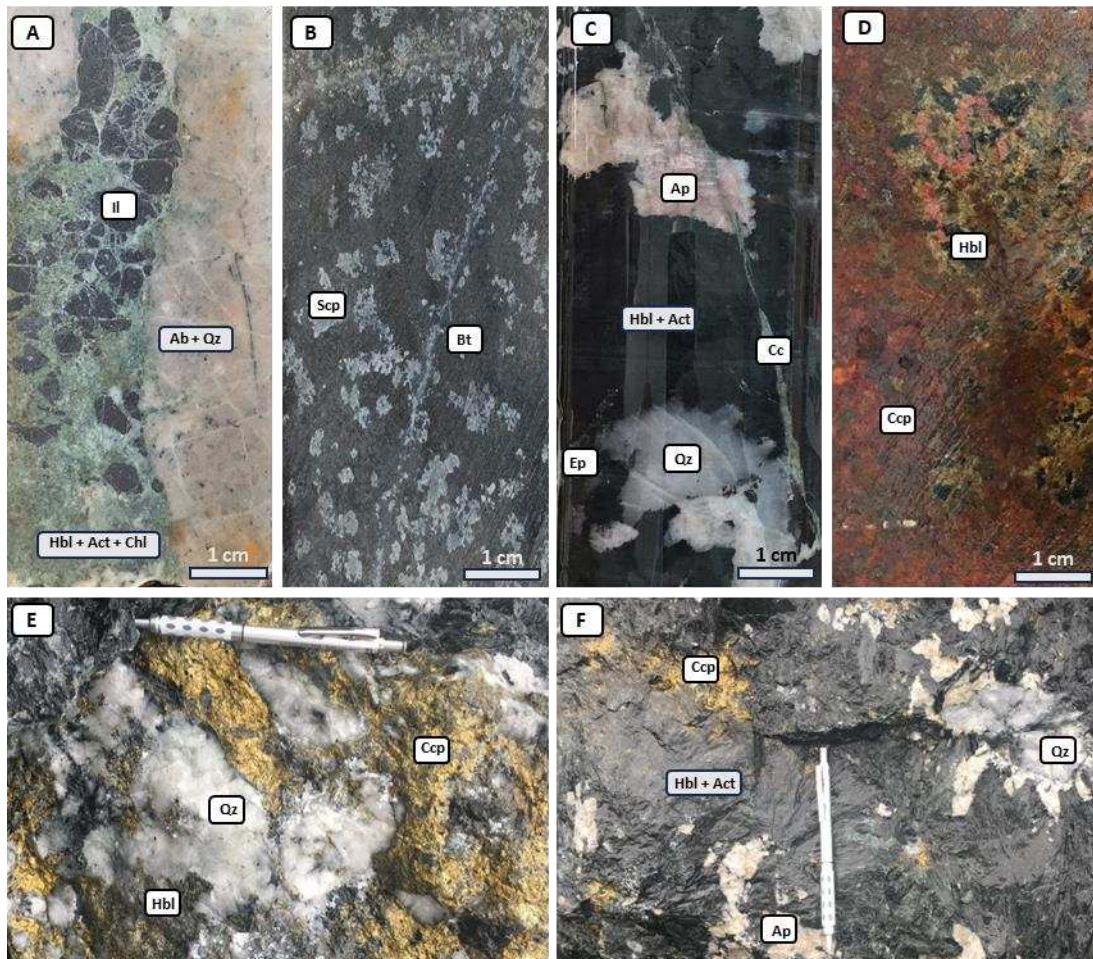
Figura 4: Litotipo fêlsico e gabro da região da mina Antas Norte. (A) Rocha vulcânica fêlsica apresentando-se brechada com formação de albíta na coloração branca e rosa, e veios de hornblenda evidência proximidade com a porção máfica e alterada. (B) Gabro apresentando matriz formada por hornblenda e augita, com cristais de plagioclásio. (C) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da rocha fêlsica alterada hidrotermalmente com presença de albíta e quartzo, e, devido à proximidade com outras alterações, presença também de hornblenda e calcita. (D) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) do gabro evidenciando o hábito alongada dos plagioclásios, com hornblenda, actinolita e clorita. (E) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da rocha fêlsica evidenciando os fenocristais de feldspato e quartzo em uma matriz de albíta e quartzo, com pequenos cristais de calcita. (F) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) do gabro com cristais de augita corroídos com hornblenda, clorita e albíta.

Alterações Hidrotermais

De uma forma geral, as alterações hidrotermais no depósito Antas Norte são intensas, obliterando parcial a totalmente as texturas originais das rochas hospedeiras, quanto mais próximo ao corpo de minério estiver. As zonas hidrotermais são verticalizadas mergulhando para sudeste e, sua distribuição e evolução são fortemente controladas pelo desenvolvimento de zona de cisalhamento dúctil - rúptil. A natureza da rocha hospedeira reflete-se na associação mineral das alterações hidrotermais, sendo mais comum alteração cálcica e potássica nas rochas vulcânicas máficas, e alteração sódica nas rochas vulcânicas félsicas.

Os estágios iniciais de alteração são identificados principalmente nas porções distais do depósito. Nas zonas proximais, prevalecem a sobreposição das fases de alteração. A partir das relações temporais entre as fases minerais hidrotermais, tais como zonas de contato, halos de substituição e resquícios de alterações anteriores inseridas em alterações posteriores, tanto na zona distal como na zona proximal, é possível identificar uma sucessão das fases de alteração hidrotermal presentes no depósito.

Nas zonas distais, há uma predominância das alterações sódica e potássica. A alteração sódica é caracterizada pela formação generalizada de albita (Fig. 5A), ocorrendo também, em menor proporção, quartzo e ilmenita (Fig. 5A). A alteração potássica é representada pela formação de biotita (Fig. 5B) e escapolita (Fig. 5B). A zona proximal, especialmente associada à mineralização, é marcada por uma transição de deformação dúctil para frágil, onde ocorre a alteração cálcica, sendo caracterizada pelos anfibólios (Fig. 5C) e apatita (Fig. 5C). A zona mineralizada está hospedada em corpos brechados (Fig. 5E e 5F), onde os clastos das rochas alteradas estão envolvidos em uma matriz de sulfetos, sendo a calcopirita (Fig. 5D) o principal representante da mineralização. Diques tardios de gabro cortam as rochas hidrotermalizadas e apresentam evidências de alteração, embora sua textura original esteja preservada. A silicificação (Fig. 5A, 5C, 5E 5F) ocorre de maneira pervasiva, sendo reconhecida em todas as outras alterações, porém sua intensidade é variável. A alteração propilítica, caracterizada por clorita (Fig. 5A), epidoto e calcita (Fig. 5C), ocorre de maneira incipiente e representa a fase hidrotermal mais tardia, sobrepondo, seletivamente, alguns minerais das alterações primárias.



Ab: albite; Act: actinolita; Ap: apatita; Bt: biotita; Cc: calcita; Chl: clorita; Ccp: calcopirita; Ep: epidoto; Hbl: hornblenda; Il: ilmenita; Qz: quartzo; Scp: escapolita.

Figura 5: Conjunto de alterações hidrotermais e mineralização da região da mina Antas Norte. (A) Fotografia da interação entre as alterações sódica (de coloração bege) e cálcica (de coloração esverdeada). Há um predominância de albite na alteração sódica com presença de quartzo. Já na alteração cálcica, hornblenda e actinolita são os minerais dominantes, sendo alterados, de maneira incipiente, para clorita e forte presença de cristais de ilmenita. (B) Fotografia da alteração potássica com seus principais componentes, a biotita formando uma matriz escura com cristais brancos de escapolita. (C) Fotografia da alteração cálcica sendo representada por uma grande massa verde-escuro formada por hornblenda e actinolita, com cristais de apatita e quartzo. Pequenos veios de calcita e epidoto ocorrem na alteração sendo produto da alteração propilitica. (D) Fotografia da zona mineralizada com porção maciça formada basicamente por calcopirita e porção mais brechada com clastos de hornblenda. (E) e (F) Porção brechada da mineralização formada pela alteração cálcica com hornblenda, actinolita e apatita, e a mineralização sendo representada pela calcopirita e o quartzo sendo produto da silicificação.

Alteração Sódica

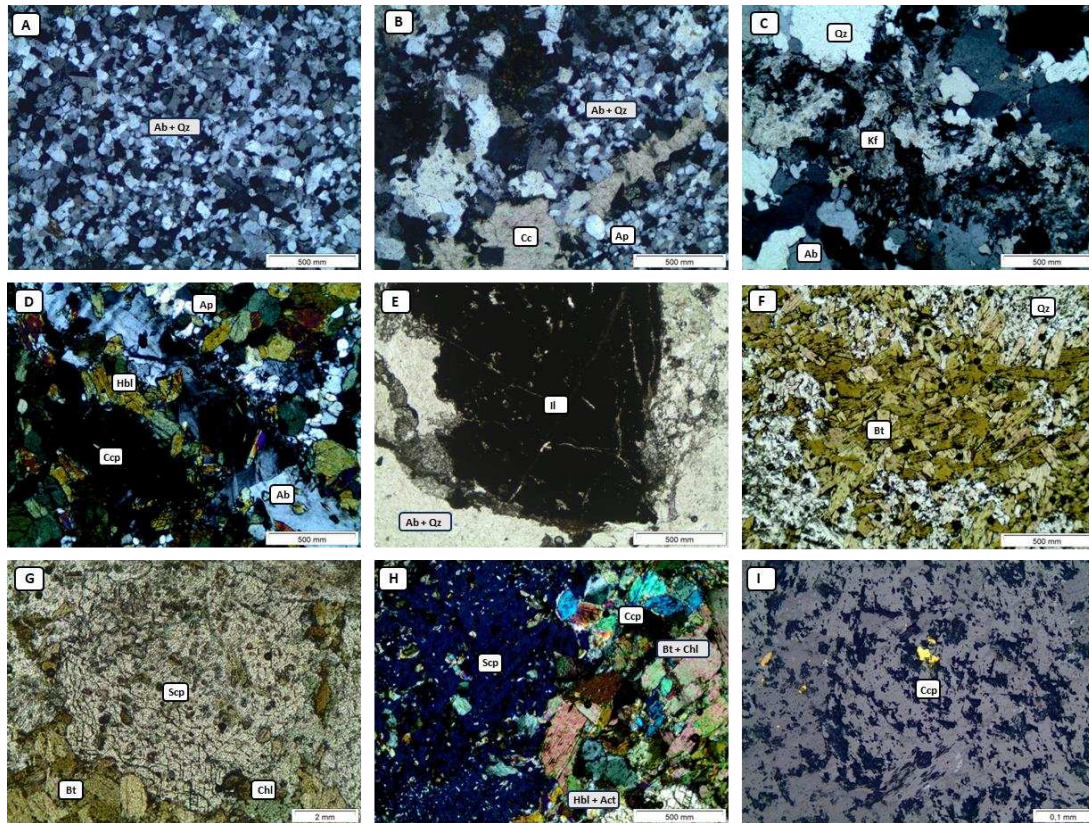
A alteração sódica corresponde ao estágio inicial das alterações hidrotermais no depósito Antas Norte e está presente, principalmente, nas porções distais. Ocorre substituindo parcial e/ou totalmente as vulcânicas félsicas, e na forma de pequenas vênulas preenchendo fraturas, apresentando coloração branca a rosada. Essa alteração resultou na precipitação de albite (Fig. 6) de granulação fina a média com cristais euédricos a subeuédricos, apresentando textura de tabuleiro de xadrez e extinção ondulada. Em alguns grãos é possível notar granulação e recristalização nas bordas, indicando que a albite se formou antes e durante os processos de deformação que foram impostos ao depósito. Cristais residuais primários de plagioclásio e feldspato potássico (Fig. 6C) exibem aspecto turvo e são substituídos parcialmente nas bordas.

Há também uma forte presença de cristais de quartzo (Fig. 6A, 6B, 6C e 6E), devido à intensa silicificação que está presente em todo o depósito. No gabro, a albita ocorre de maneira incipiente e forma-se intersticialmente aos cristais de plagioclásio primário, bastante saussuritizados, e relíquias de piroxênio e anfibólios. Em porções restritas e proximais à mineralização, minerais como anfibólios (Fig. 6D), ilmenita (Fig. 6E), calcita (Fig. 6B), apatita (Fig. 6B e 6D) e calcopirita (Fig. 6D) estão presentes.

Alteração Potássica

A alteração potássica é bem desenvolvida no depósito Antas Norte e marcada pela associação biotita-escapolita, substituindo os minerais primários preferencialmente nas vulcânicas máficas. A biotita (Fig. 6F, 6G e 6H) representa o principal mineral de alteração, embora o feldspato potássico, mais raramente, também possa ocorrer substituindo cristais de plagioclásio. Comumente, a biotita forma agregados e substitui minerais máficos, como o piroxênio e, mais subordinadamente, o anfibólio. A escapolita (Fig. 6G e 6H) ocorre como porfiroblastos e, em alguns casos, zonados, caracterizando-se por ter uma baixa birrefringência. Possivelmente, essa geração de escapolita representa o produto da alteração hidrotermal de plagioclásio pré-existente na rocha. Os cristais de escapolita mostram, por vezes, extinção ondulante e encontram-se bastante fraturados, indicando terem sido afetados por deformação no regime próximo à transição dúctil-rúptil.

As rochas alteradas apresentam coloração cinza a marrom devido à predominância de biotita e manchas brancas representadas por cristais de escapolita. Cristais de quartzo ocorre em menor quantidade, se comparado com a alteração sódica. Nas zonas proximais, em contato com a alteração cálcica (Fig. 6H e 6I), o conjunto mineral identificado inclui biotita + hornblenda + actinolita \pm calcopirita. A clorita (Fig. 6G e 6H) se desenvolve a partir da alteração da biotita, principalmente, ao longo das bordas.



Ab: albita; Act: actinolita; Ap: apatita; Bt: biotita; Cc: calcita; Ccp: calcopirita; Chl: clorita; Hbl: hornblenda; Il: ilmenita; Kf: k-feldspato; Qz: quartz; Scp: escapolita; XPL: nicóis cruzados; PPL: nicóis paralelos.

Figura 6: Alterações hidrotermais da região da mina Antas Norte, com foco na sódica e potássica. (A) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da porção da alteração sódica com a matriz fina sendo formada basicamente por albita e quartzo, sendo esse último produto de silicificação. (B) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da porção da alteração sódica com a matriz média sendo formada por albita e quartzo, mas com presença de calcita preenchendo veio e pequenos cristais de apatita. (C) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da presença de cristais de Kf turvos com albita e quartzo. (D) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da interação entre alteração sódica e cálcica próximo a mineralização com presença de albita representando a alteração sódica, hornblenda e apatita representando a alteração cálcica, e a calcopirita (opaco) representando a mineralização. (E) Fotomicrografia (luz transmitida – PPL) de cristal de ilmenita sendo bordejado por uma matriz de albita e quartzo. (F) Fotomicrografia (luz transmitida – PPL) de um aglomerado de biotita, sendo a principal característica da alteração potássica, com cristais de quartzo dispersos. (G) Fotomicrografia (luz transmitida – PPL) de um porfiroblasto de escapolita sendo bordejado por um conjunto de biotitas representando a associação mineral da alteração potássica. Clorita incipiente alterando a biotita. (H) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da interação incipiente entre alteração potássica e cálcica, onde cristais de escapolita e biotita entram em contato com hornblenda, actinolita e calcopirita. Clorita ocorre alterando as bordas da biotita. (I) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) de uma massa de biotita com cristais de calcopirita devido à proximidade com a mineralização.

Alteração Cálcica

Sendo melhor desenvolvida nas rochas vulcânicas máficas, onde oblitera severamente as associações minerais primárias, a alteração cálcica é a hospedeira da mineralização e apresenta-se brechada, devido ao controle estrutural rúptil imposto à ela. Possui coloração verde escuro, resultado da abundância de hornblenda e actinolita que, preferencialmente, substituíram os minerais ferromagnesianos primários. A hornblenda (Fig. 7A e 7C) ocorre como cristais subeuédricos a anédricos de granulação média a grossa, possuindo pleocroísmo de verde a marrom. A actinolita (Fig. 7B e 7E) forma agregados de granulação fina a média, sendo localmente representada por cristais aciculares, podendo ocorrer também nas bordas dos cristais de hornblenda.

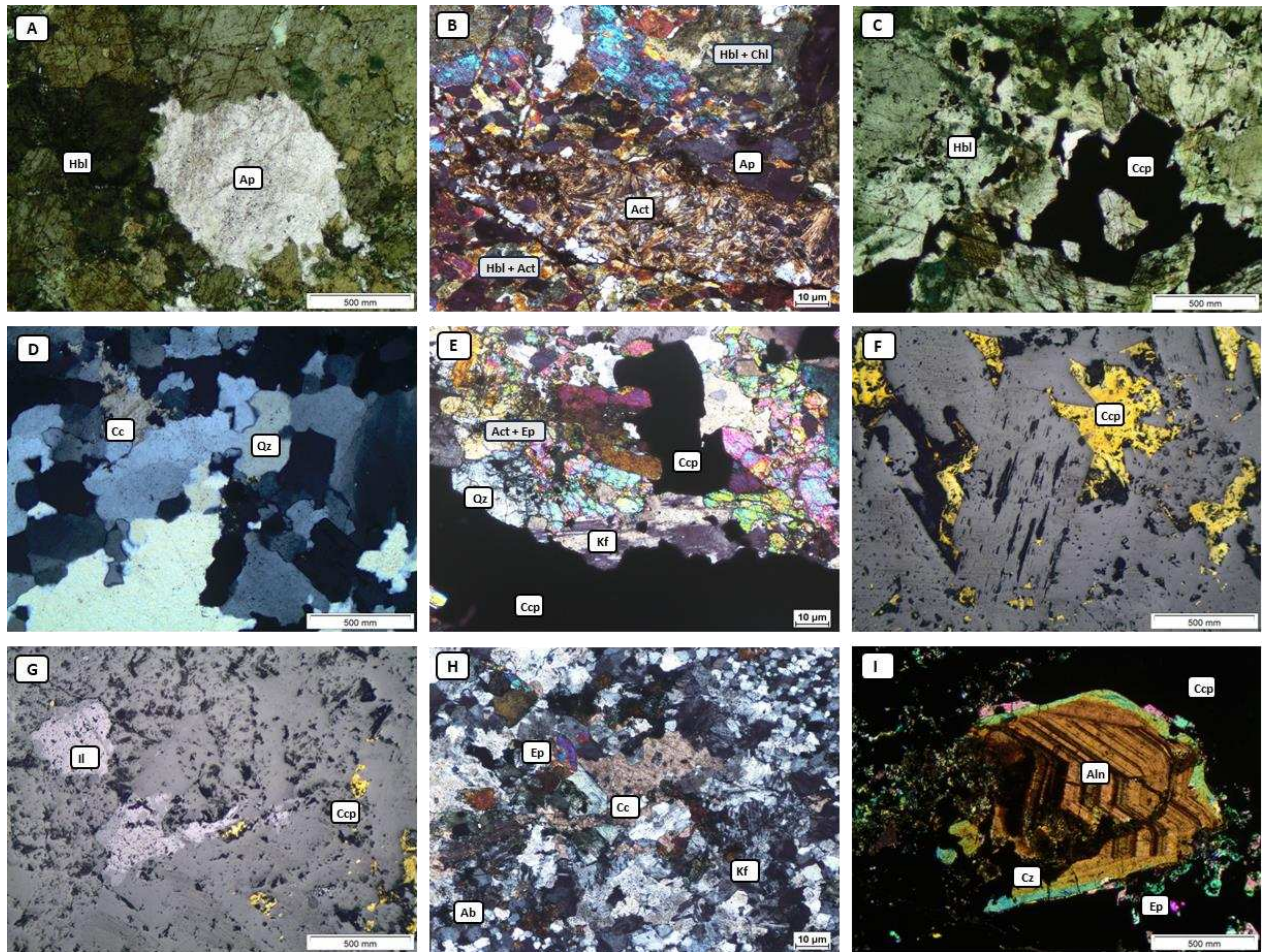
Apatita (Fig. 7A e 7B) e quartzo (Fig. 7D e 7E) ocorrem de forma abundante na alteração e são os principais minerais subordinados, formando, macroscopicamente, cristais centimétricos de coloração rosada e branca, respectivamente. Microscopicamente, a apatita ocorre em grãos isolados ou agregados tendendo a arredondados com coloração cinza. Já o quartzo ocorre com cristais subédricos a anédricos esbranquiçados. Epidoto (Fig. 7E), clorita (Fig. 7B) e calcita (Fig. 7D e 7H) ocorrem de maneira tardia, normalmente substituindo os minerais hidrotermais. Minerais opacos como ilmenita (Fig. 7G) e calcopirita (Fig. 7F) são comuns devido à proximidade da mineralização.

Silicificação

A silicificação é a alteração que afeta tanto as vulcânicas félsicas como as vulcânicas máficas do depósito Antas Norte, e, em menor proporção, está presente também no gabro, geralmente, sobrepondo-se as alterações pretéritas. Nas zonas distais do depósito, a silicificação constitui uma alteração pervasiva na matriz da rocha, na qual, o quartzo, de granulação fina a média, preenche espaços intersticiais ou forma bolsões, ora monominerálicos, ora associados a cristais de albita (Fig. 6A) ou biotita (Fig. 6F), que representam as alterações sódica e potássica, respectivamente. Na zona proximal do depósito, os cristais de quartzo formam grãos subédricos a anédricos e, devido ao cisalhamento, apresentam-se milonitizados e com extinção ondulante. Por conta da interação com a alteração cálcica e da proximidade com a mineralização, os cristais de quartzo (Fig. 7D e 7E) estão associados a apatita, anfibólio e calcopirita.

Alteração Propilítica

Sendo a alteração mais tardia em relação às demais zonas de alteração hidrotermal e a mineralização do depósito, ocorre de maneira incipiente em zonas proximais da mineralização, tanto nos protólitos félsicos como nos máficos, e é marcada pelo desenvolvimento de clorita, epidoto e calcita. A clorita (Fig. 6G, 6H e 7B) ocorre de maneira seletiva e sobrepõe minerais formados em estágios prévios de alteração hidrotermal, como biotita e anfibólios, resultando em substituição parcial, a partir das bordas, fraturas ou planos de clivagem, podendo estar associada ao epidoto. A calcita (Fig. 7D e 7H) ocorre formando vênulas ou veios que cortam a rocha, além de, esporadicamente, formar halos de alteração nas bordas dos minerais e cristais. Epidoto (Fig. 7E e 7I) ocorre disseminados ou agregados de granulação fina à média preenchendo os espaços entre os cristais de anfibólios, podendo ocorrer também alanita e clinozoisita quando associados à alteração cálcica. A alanita (Fig. 7I) forma cristais zonados de granulação grossa que apresentam halos metamíticos e bordas que, normalmente, graduam para epidoto ou clinozoisita (Fig 7I).



Ab: albita; Act: actinolita; Aln: alanita; Ap: apatita; Cc: calcita; Ccp: calcopirita; Chl: clorita; Cz: clinozoisita; Ep: epidoto; Hbl: hornblenda; Il: ilmenita; Kf: k-feldspato; Qz: quartz; XPL: nicóis cruzados; PPL: nicóis paralelos.

Figura 7: Alterações hidrotermais da região da mina Antas Norte, com foco na cálcica e propilitica. (A) Fotomicrografia (luz transmitida – PPL) da alteração cálcica mostrando minerais de anfibólio e, ao centro, cristal de apatita. (B) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) de cristais aciculares de actinolita e ao seu redor um conjunto de hornblenda, apatita e clorita, demonstrando o caráter brechado da alteração cálcica. (C) Fotomicrografia (luz transmitida – PPL) de cristais de hornblenda na zona proximal da mineralização com a presença de calcopirita. (D) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) zona da alteração cálcica com forte presença de quartzo por conta da silicificação e calcita representando alteração propilitica incipiente. (E) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) zona brechada com cristais de actinolita, epidoto, quartzo e kf, bordejando cristais de calcopirita. (F) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) cristais de calcopirita imersos em massa de hornblenda. (G) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) zona de brechação mineralizada contendo cristais de calcopirita e ilmenita numa matriz de hornblenda e actinolita. (H) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da zona de alteração sódica com influência de alteração propilitica devido à presença de calcita e epidoto. (I) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da alteração propilitica imersa em cristais de calcopirita, sendo representada pela presença de alanita com halos metamórficos bordejada por epidoto e clinozoisita.

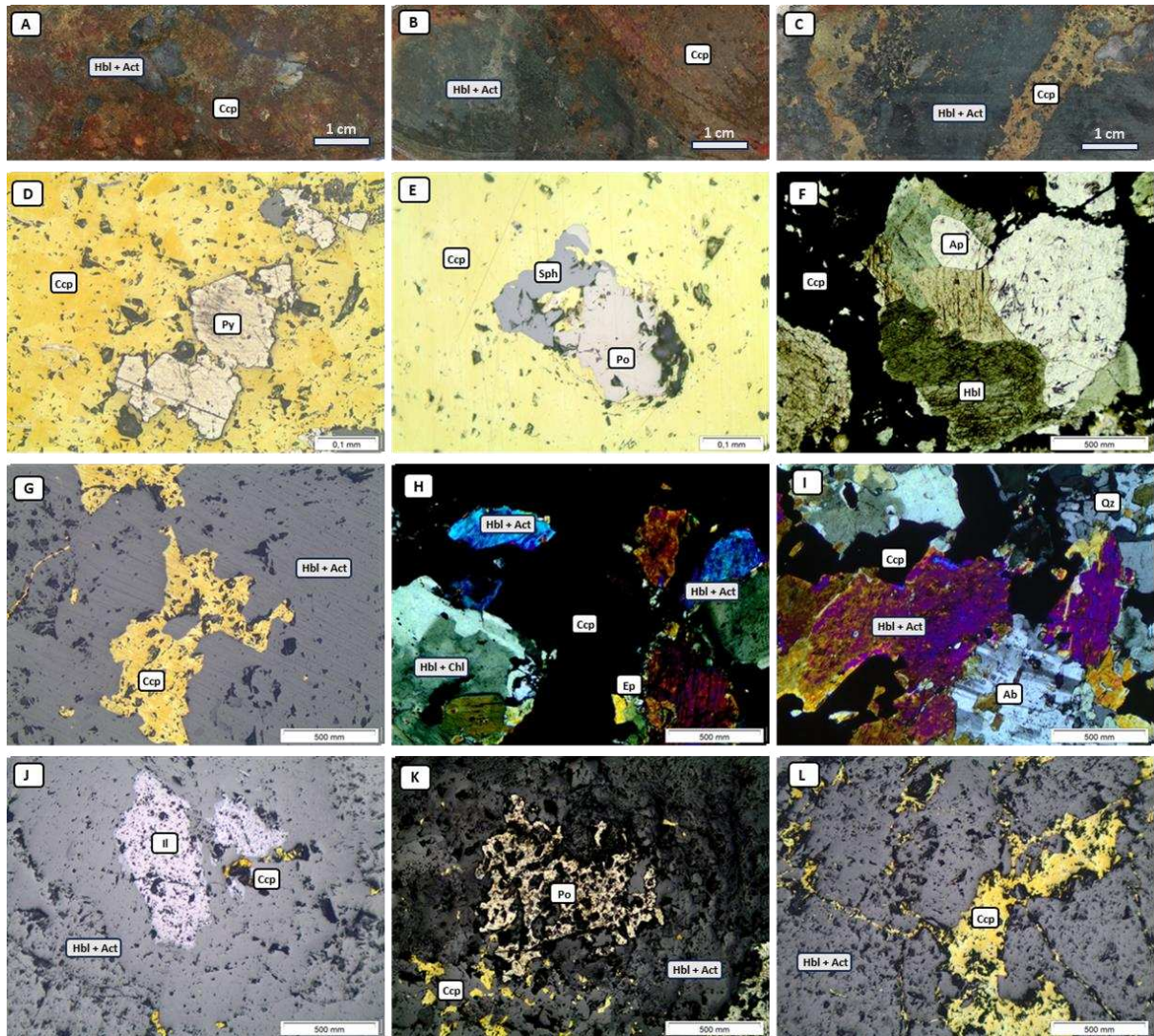
Mineralização

Hospedada nas rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará e, especialmente, associada à alteração cálcica, a mineralização de cobre do depósito Antas Norte foi concentrada dentro de um corpo que possui um mergulho subvertical para sudeste e apresenta direção NE-SW. Sendo representada, principalmente, por calcopirita, a mineralização ocorre de três formas: a primeira, no centro do corpo, como minério maciço (Fig. 8A); a segunda, nas bordas do corpo e interagindo com as alterações hidrotermais, na forma brechada (Fig. 8B); e a terceira, menos expressiva, como veios e vênulas (Fig. 8C). Estando associada a um regime dúctil-rúptil, as zonas centrais da mineralização não estão deformadas, porém, esse cenário muda nas bordas do

corpo, devido à brechação. A presença de ouro é confirmada a partir dos dados químicos, pois não se identificou o mesmo nas lâminas petrográficas.

Nas porções de sulfeto maciço, com calcopirita (Fig. 8D e 8E) predominante e, inclusões de pirrotita (Fig. 8E), pirita (Fig. 8D) e esfalerita (Fig. 8E), é possível observar que as zonas de alterações pretéritas são envolvidas pela mineralização. São observados núcleos (Fig. 8F) com hornblenda, actinolita e apatita preservadas. As brechas constituem uma associação de minério formada por calcopirita + pirrotita + pirita ± ilmenita + esfalerita ± pentlandita + hornblenda + actinolita ± quartzo + apatita ± clorita ± epidoto ± albita. A matriz dessas brechas é dominada por calcopirita (Fig. 8G, 8H e 8I) e fases acessórias com pirrotita (Fig. 8K), pirita, ilmenita (Fig. 8J), esfalerita e pentlandita. Minerais hidrotermais deformados associados ao minério apresentam-se na forma de clastos angulosos à arredondados e compreendem hornblenda (Fig. 8H e 8I), actinolita (Fig. 8H e 8I), quartzo (Fig. 8I) e apatita. Em menor quantidade, clorita (Fig. 8H) e epidoto (Fig. 8H) ocorrem em zonas onde há alteração propilítica. A albita (Fig. 8I) ocorre de maneira bastante específica, quando a mineralização e a alteração cálcica entram em contato com a alteração sódica.

A mineralização de cobre em vênulas e veios ocorrem preferencialmente cortando as zonas de alteração cálcica e sódica proximais à mineralização. Elas são compostas, predominantemente, por calcopirita (Fig. 8L) e, em menor quantidade, pirrotita e ilmenita, formando associações com anfibólios, albita e quartzo. Apesar dos diques de gabro cortarem porções da zona de minério, eles apresentam poucas vênulas preenchidas por calcopirita.



Ab: albita; Act: actinolita; Ap: apatita; Ccp: calcopirita; Chl: clorita; Ep: epidoto; Hbl: homblenda; Il: ilmenita; Qz: quartz; Po: pirrotita; Py: pirita; Sph: esfalerita; XPL: nicóis cruzados; PPL: nicóis paralelos.

Figura 8: Zona mineralizada da região da mina Antas Norte. (A) Fotografia da mineralização maciça de calcopirita com pequenos cristais de homblenda e actinolita. (B) Fotografia da mineralização brechada com grandes porções de homblenda e actinolita, e porções com calcopirita. (C) Fotografia da mineralização preenchendo veios com calcopirita. (D) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) da zona maciça do minério com calcopirita sendo o mineral predominante e pirita como acessório. (E) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) da zona maciça com presença de calcopirita, pirrotita e esfalerita. (F) Fotomicrografia (luz transmitida – PPL) do núcleo de homblenda e apatita preservado na zona maciça do minério de calcopirita. (G) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) da zona de brechação mineralizada contendo cristais de calcopirita sendo bordejados por homblenda e actinolita. Também está presente pequenos veios preenchidos por calcopirita. (H) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da zona brechada da mineralização dominada por homblenda e actinolita. Devido a alteração propilitica, clorita e epidoto ocorrem de maneira incipiente. (I) Fotomicrografia (luz transmitida – XPL) da interação da mineralização (calcopirita) com as zonas cálcica (homblenda e actinolita) e sódica (albita), e a presença de quartzo para confirmar a silicificação. (J) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) da zona de minério brechado com a presença de ilmenita e pequenos cristais de calcopirita, sendo bordejada por homblenda e actinolita. (K) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) do aspecto brechado da pirrotita e da calcopirita. (L) Fotomicrografia (luz refletida – PPL) dos veios sendo preenchidos por calcopirita e cortando homblenda e actinolita.

Geologia Estrutural

A Província Mineral de Carajás teve sua evolução marcada por uma diversidade de eventos tectônicos que ocorreram, principalmente, entre o Arqueano e Paleoproterozoico. Distintos modelos evolutivos e hipóteses tem sido proposto por pesquisadores para sua evolução, na tentativa de compreender os mecanismos responsáveis pela formação da província e dos distintos depósitos minerais identificados.

A tectônica registrada no depósito Antas Norte está condicionada a amplos lineamentos estruturais regionais de trend NW-SE que constituem o Sistema Transcorrente Carajás. A deformação impressa nas rochas é heterogênea, com desenvolvimento de tramas dúcteis a rúpteis. Em afloramentos e testemunhos de sondagem podem ser observadas estruturas como foliação milonítica e brechação associadas ao desenvolvimento de zona de cisalhamento NE-SW, sendo esta uma estrutura secundária da principal regional e espacialmente relacionada ao controle da mineralização. Zona de falhas com diferentes orientações refletem os lineamentos regionais.

Os eventos deformacionais originaram rochas deformadas e zona de cisalhamento que permitiram a percolação de fluidos desenvolvendo um sistema hidrotermal, que obliterou parcial ou totalmente as feições primárias e suas relações com os protólitos e dificultaram o posicionamento das rochas originais e seus produtos hidrotermais. As descrições e as análises estruturais das rochas demonstraram uma relativa simplicidade no arcabouço estrutural do depósito, com desenvolvimento de duas fases deformacionais preservadas entre estruturas dúcteis a dúcteis-rúpteis. É possível interpretar que estes dois eventos deformacionais estejam relacionados a um mesmo processo deformacional cisalhante regional que afetou a Província Mineral de Carajás.

Uma foliação pretérita S_n , preservada em poucos pontos devido à grande alteração que foi imposta às rochas da mina e com planos definidos por anfibólios, plagiocásios e biotita, é definida como a estrutural dúctil mais antiga nas rochas do depósito, possuindo direção NNE-SSW e mergulho ESE (Fig. 10A). A instalação da zona de cisalhamento resultou em uma foliação milonítica S_{n+1} , penetrativa, anastomosada a paralela, marcada principalmente pela orientação dos minerais máficos (anfibólios e biotita) contornando porfiroclastos de quartzo e feldspatos onde observa-se borda de cominuição e recristalização, cuja presença é dependente da natureza do protólito. A foliação S_{n+1} associa-se aos minerais formados pelo sistema hidrotermal, apresentando direção preferencial ENE-WSW e mergulho para SSE (Fig. 10B).

No contexto local, o corpo de minério está situado em um estrutura sigmoidal SC (Fig. 9), relacionada a zona de cisalhamento transcorrente dextral. A estrutura C é representada pela foliação S_{n+1} (Fig. 10B), enquanto a estruturação S é dada pela foliação S_n (Fig. 10A). O corpo de minério principal é hospedado ao longo da estruturação S. Isto ocorre, fundamentalmente pela percolação de fluidos preferencialmente em zonas de dilatação alojadas nas zonas S. Dados de lineação de estiramento alinhada segundo plunge 54/225 Az podem controlar os corpos de minério em sub-superfície.

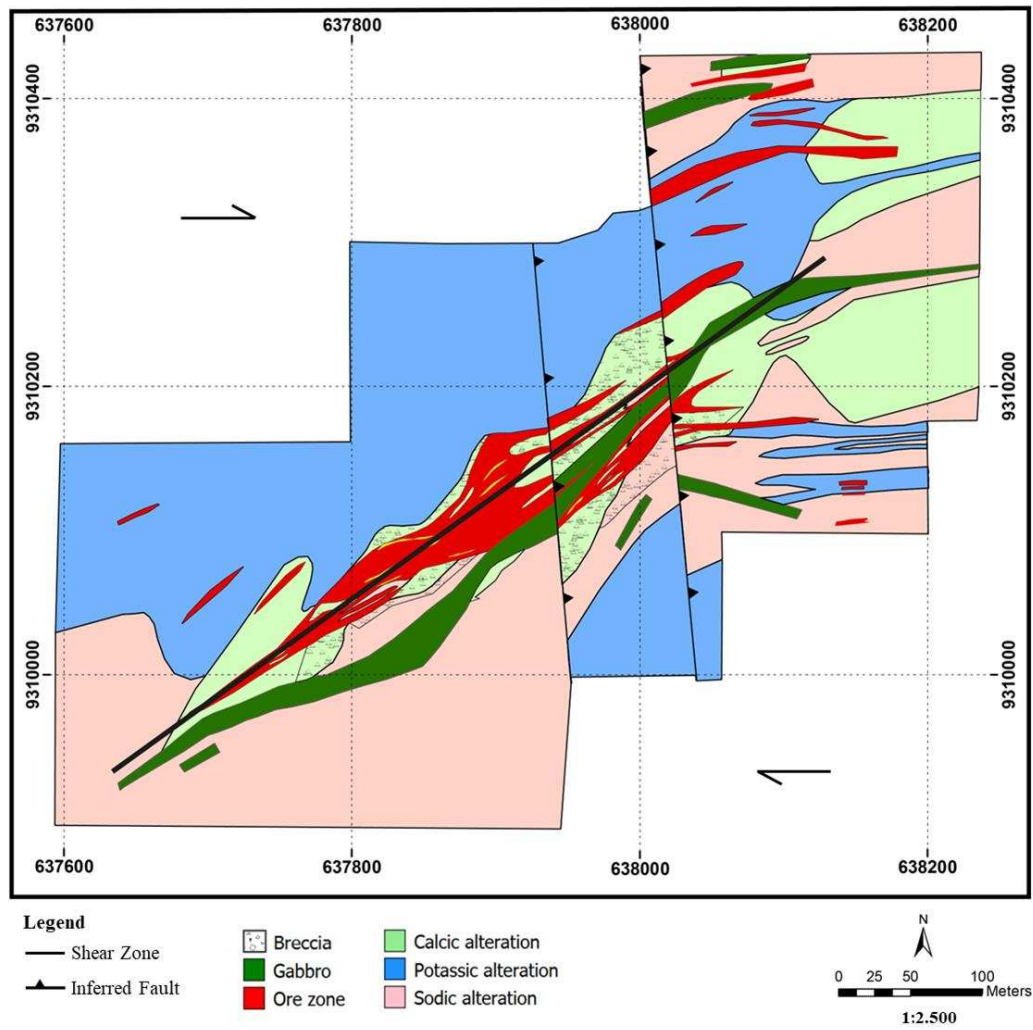


Figura 9: Mapa de alterações hidrotermais da mina Antas Norte com estrutura SC (Modificado dos arquivos internos da Oz Minerals).

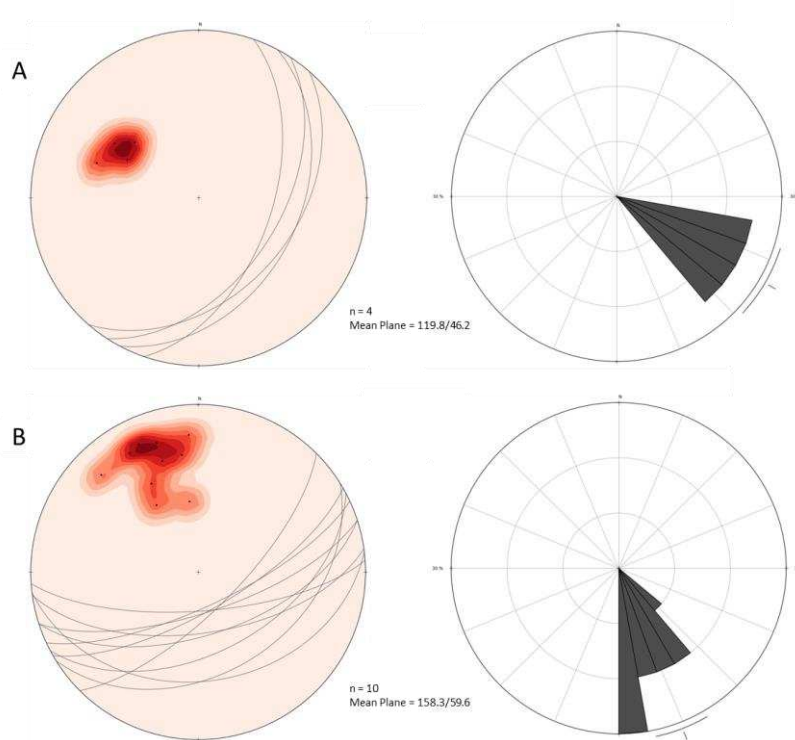


Figura 10: Diagrama de rosetas, planos e polos plotados. (A) Dados das estruturas Sn; (B) Dados das estruturas Sn+1.

Ainda associada ao desenvolvimento desta foliação milonítica, observa-se a presença de brechação com diferentes fragmentos subarredondados circundados por uma massa rica em anfibólios com sulfetos associados, devido à interação com a zona mineralizada e aos diversos pulsos de reativação ao longo do episódio de cisalhamento registrado no depósito, que acarretou a superposição de zonas mais tardias brechas retrabalhando zonas miloníticas já mineralizadas. A repetição deste processo tectônico e hidrotermal, leva ao aumento da espessura do corpo mineralizado.

As estruturas rúpteis são tardias, caracterizadas pela geração de falhas, fraturas e veios que truncam os domínios que ocorrem no depósito. As principais representantes dessas estruturas são as falhas preenchidas pelo Gabro, onde as mesmas cortam toda a cava da mina e possuem direção preferencial NE-SW (Fig. 11A), direção similar a zona de cisalhamento que aloja o minério. O outro conjunto de falhas apresenta direção NNW-SSE (Fig. 11B) e são responsáveis, localmente, por um deslocamento sinistral rúptil de parte das rochas do depósito. Tal deslocamento foi interpretado a partir dos mapas e das seções, visto que as medidas de lineação mineral seriam influenciadas devido ao grau de brechação e alteração das rochas. É possível notar também a presença de *slickensides* nos planos de falha, evidenciando movimentação relativa entre os blocos. Veios e pequenas fraturas preenchidas por quartzo, clorita, anfibólio,

calcita ou epidoto, podendo ter sulfetos subordinados, ocorrem de maneira disseminada e em diversas direções (Fig. 11C), porém, com pequenas dimensões.

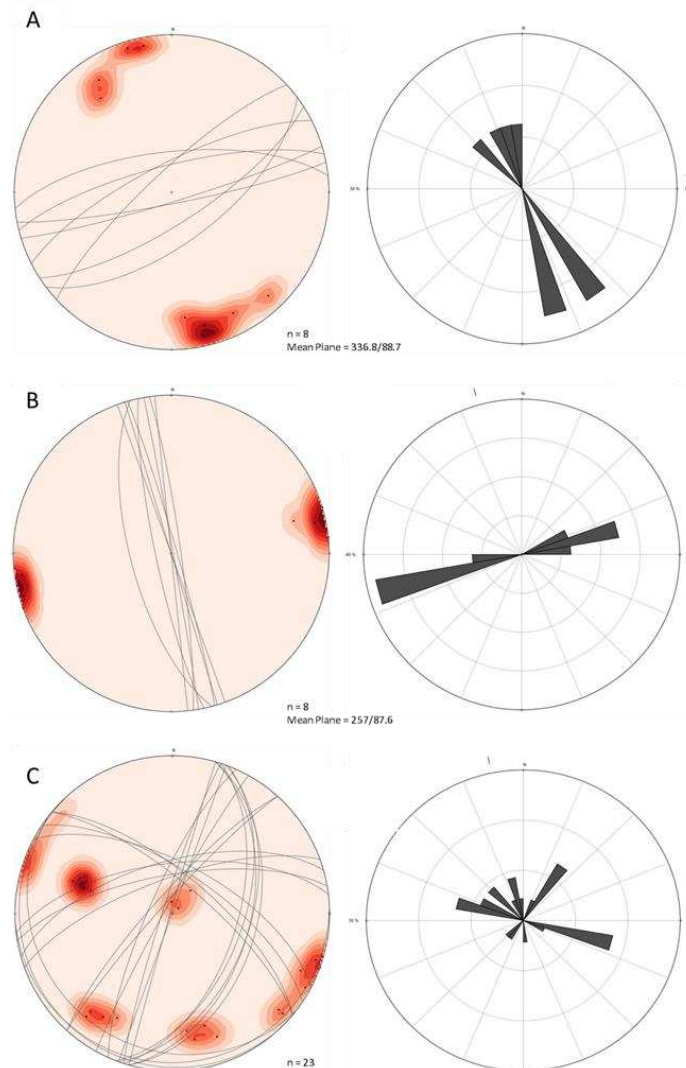


Figura 11: Diagrama de rosetas, planos e polos plotados. (A) Dados das falhas relacionadas ao Gabro; (B) Dados das falhas responsável por um deslocamento incipiente do corpo de minério; (C) Dados das fraturas e dos veios que cortam o depósito em várias direções.

Modelagem 3D

A modelagem 3D das alterações hidrotermais e do corpo de minério do depósito Antas Norte usa o método de modelagem implícita e é construído com base no conjunto de dados de furos de sondagem, seções geológicas e topografia da cava. O modelo construído é apresentado na Figura 12. Uma zona de cisalhamento com direção NE-SW foi caracterizada no modelo, onde o minério foi alojado. Além disso, um conjunto de falhas pouco desenvolvidas apresentando direção preferencial NNW-SSE são responsáveis, localmente, por um deslocamento sinistral aparente de parte do corpo mineralizado. Os corpos de gabro que cortam toda a área do depósito também estão representados no modelo.

O papel da zona de cisalhamento é crítico para explicar a gênese, localização e estrutura da mineralização que está presente no depósito Antas Norte. O modelo 3D sugere que a circulação e a precipitação hidrotermal são altamente concentradas e localizadas ao longo desta zona, atuando como canal de alimentação para os fluidos mineralizantes.

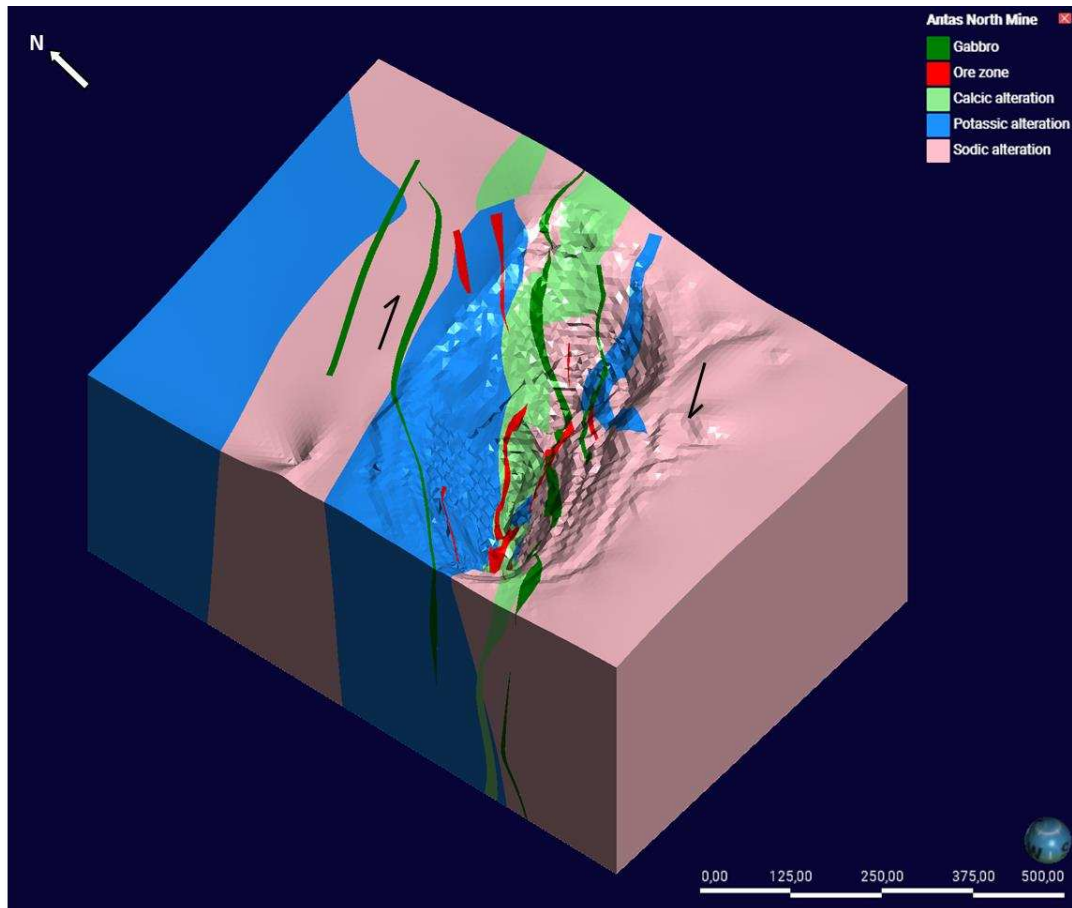


Figura 12: Modelo 3d da mina Antas Norte, mostrando todo o conjunto de alterações, o corpo mineralizado e a cava da extração.

A morfologia e a distribuição espacial das zonas de alterações hidrotermais (Fig. 13) são dependentes dos protólitos, mesmo que essas rochas já estejam completamente alteradas e apenas alguns minerais pertencentes às rochas iniciais possam ser identificadas. O modelo 3D pôde caracterizar as três principais zonas de alterações (sódica, potássica e cálcica) e demonstrar as correlações espaciais entre as mesmas e o corpo mineralizado. Sendo as principais alterações em escala regional na Província Mineral de Carajás, as alterações sódica e potássica são as melhores desenvolvidas e, por consequência, as que apresentam maior volume. Já a alteração cálcica está na região central do depósito, apresentando uma estreita relação espacial com a zona mineralizada. Através do modelo foi possível constatar a continuidade das alterações em profundidade e suas relações de contato. Devido ao caráter disseminado, tanto a silicificação como a alteração propilitica não possuíram sólidos individuais na modelagem.

A morfologia do corpo de minério (Fig. 13) abrange uma tendência de mineralização em formato tabular mergulhando abruptamente para sudeste, concordante com a zona de cisalhamento e com contato bem definido com as rochas alteradas hidrotermalmente. O minério maciço se encontra no centro do corpo e é rodeado por um envelope de minério brechado e disseminado. O corpo de minério é relativamente simples, possuindo forte continuidade e espessuras estáveis. A principal zona de mineralização foi definida com 350 metros de comprimento ao longo do strike, 200 metros de comprimento em profundidade e podendo ter até 35 metros de largura. As zonas maciças de sulfeto de alto teor (> 3% de cobre) geralmente têm de 2 a 5 metros de comprimento e são cercadas por uma zona mais ampla de mineralização disseminada de baixo teor (< 3% de cobre).

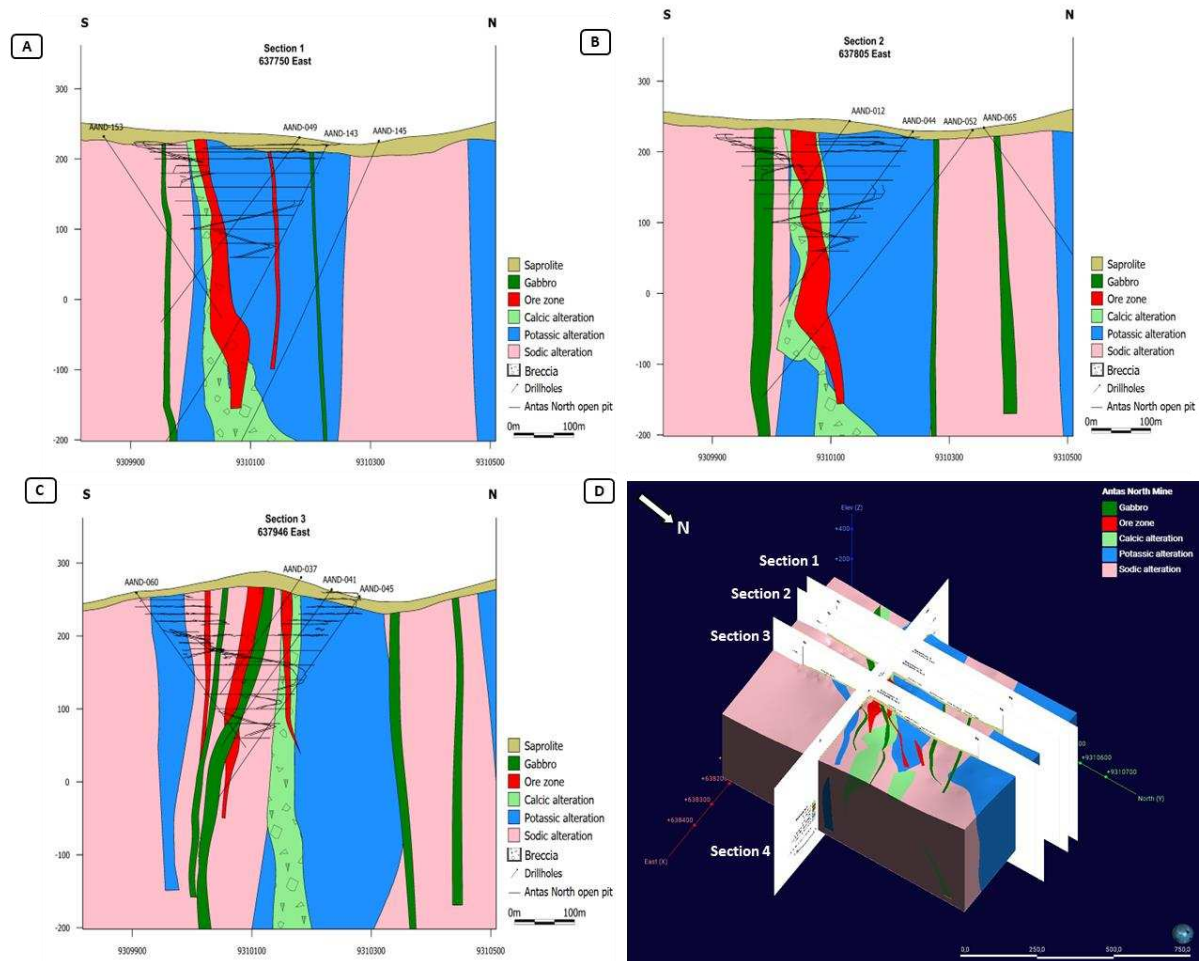


Figura 13: Morfologia e distribuição das zonas de alteração hidrotermal da mina Antas Norte. (A), (B) e (C) são seções da mina onde é possível identificar a geometria dos corpos bem como seu mergulho; (D) é um esquema da mina com as seções geradas para melhor entendimento da posição das mesmas.

Outra característica do modelo 3D é a evidência, a partir dos dados de testemunhos de sondagem, descrição e amostragem, da continuação descendente da zona mineralizada com *plunge* para sudoeste (Fig. 14), mostrando que a mineralização permanece aberta em

profundidade. No entanto, com espessuras e teores variáveis, essa continuação pode apresentar caráter subeconômico.

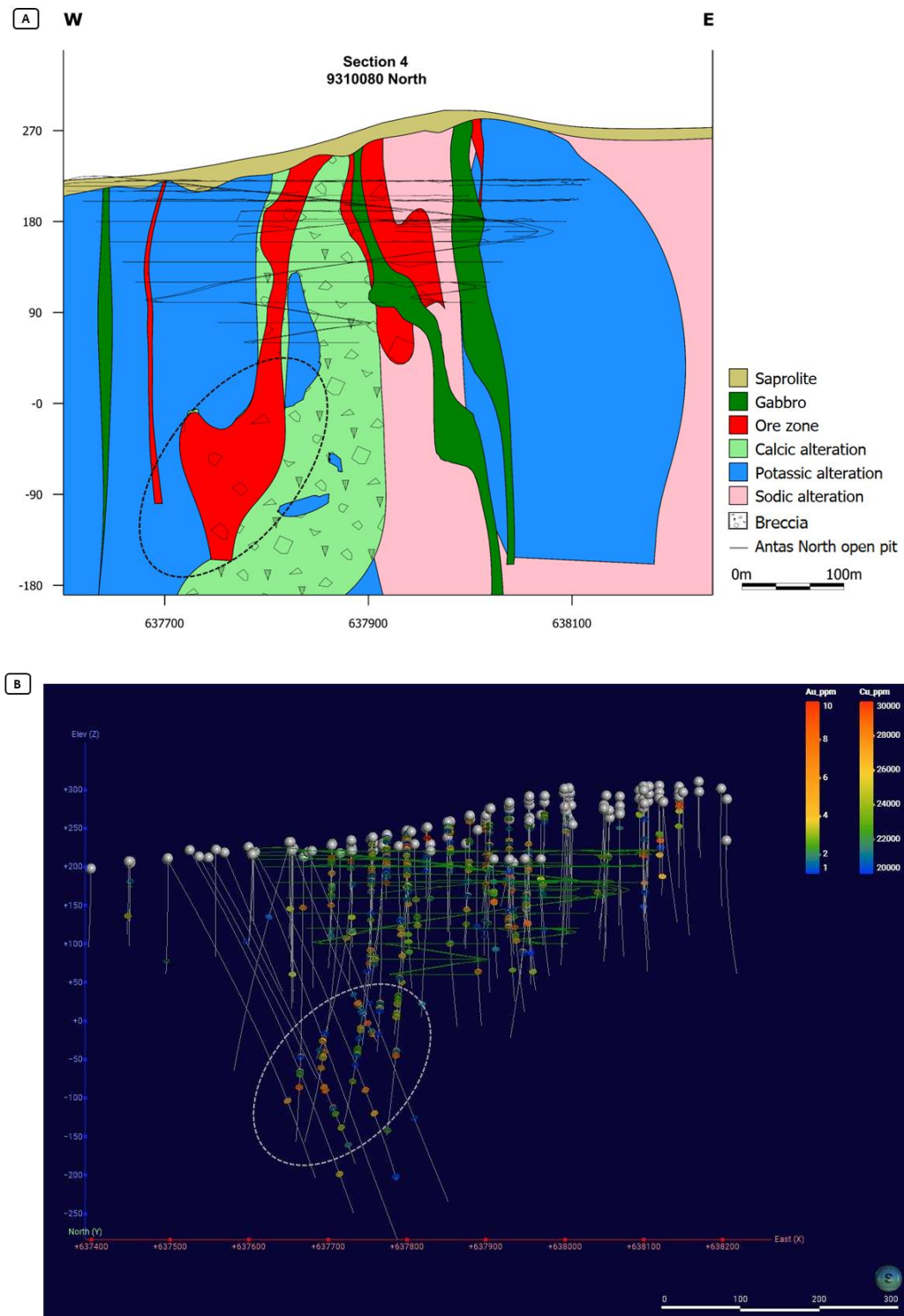


Figura 14: Evidência que a mineralização continua presente em profundidade. (A) Evidência a partir das descrições dos furos de sondagem; (B) Evidência a partir dos teores de Cu e Au.

DISCUSSÕES

Evolução do Sistema Hidrotermal

O depósito Antas Norte está localizado nas proximidades da falha Carajás, regional e com direção ESE-WNW, onde outros depósitos IOCG também são conhecidos, sendo os depósitos Cristalino e Alemão os principais. No entanto, o depósito está intimamente relacionado a uma zona de cisalhamento secundária de tendência NE-SW, que representa o controle estrutural local sobre a mineralização. Porções das rochas hospedeiras são milonitizadas e apresentam intensa alteração hidrotermal.

Com base nas informações obtidas a partir dos testemunhos de sondagem e com suporte da petrografia, é possível delimitar uma possível linha de evolução temporal relativa (Tabela 1) dos tipos de alteração hidrotermal e da mineralização, e de sua dinâmica térmica. Isso é possível principalmente com base na observação dos diferentes tipos de alteração hidrotermal e suas relações genéticas.

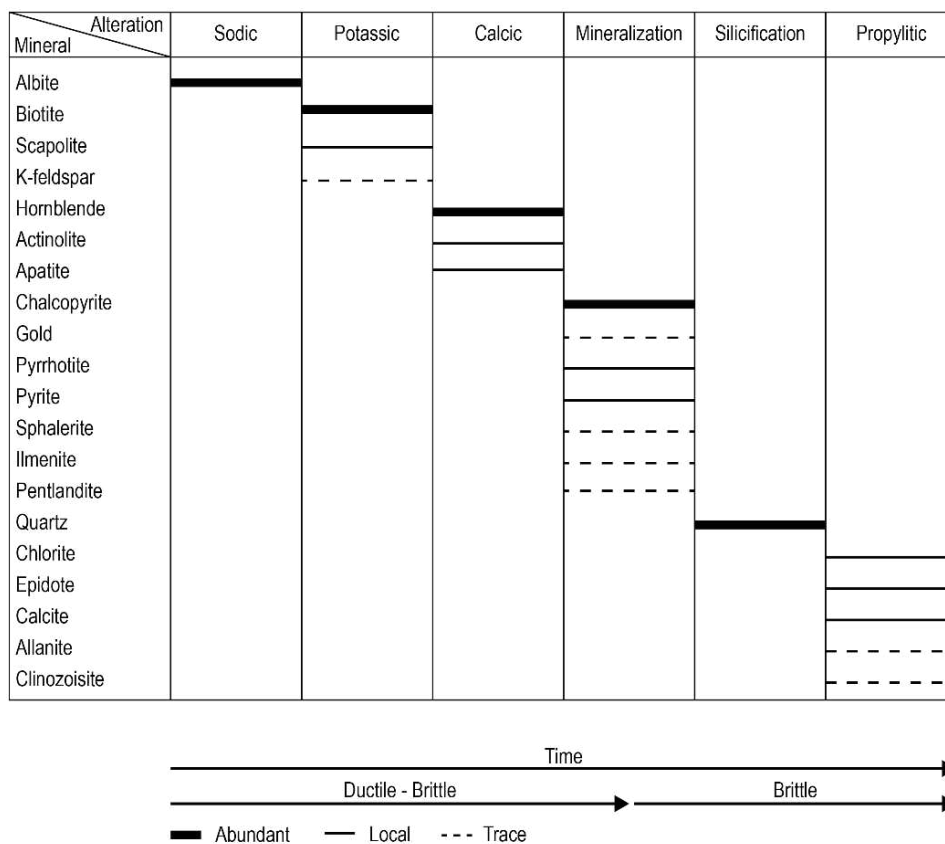


Tabela 1: Sequência paragenética das alterações hidrotermais e mineralização no depósito Antas Norte.

Contendo zonas de alterações hidrotermais semelhantes às reconhecidas em outros depósitos do tipo IOCG e com halos regionais, Antas Norte apresenta evidências de intensas alterações sódica (albita) e potássica (biotita, escapolita e, raramente, feldspato potássico), seguidas por alteração cálcica que acompanha a mineralização cuprífera, silicificação e alteração propilítica tardia. Os processos de alteração hidrotermal ocorreram de formas diversas, resultando em estilo desde pervasivo, constituindo zonas, ou de forma mais fissural. Essas zonas de alteração são formadas em temperaturas distintas, desde relativamente altas, como a sódica, até temperaturas relativamente baixas, como a propilítica.

As alterações pervasivas são fortemente relacionadas com os estágios de deformação dúctil, e, possivelmente, são os de maior temperatura. Já os estágios de alteração mais tardios e relacionados com estruturas rúpteis seriam os de menor temperatura.

Os diferentes estágios de alteração hidrotermal reconhecidos no depósito Antas Norte parecem ter sido fortemente controlados tanto pela natureza das rochas encaixantes, como pelo desenvolvimento de zona de cisalhamento. A natureza das rochas hospedeiras foi obliterada e protólitos distintos desenvolveram paragênese hidrotermal semelhante, o que aponta para altas razões de interação fluido-rocha.

A zona de cisalhamento secundária NE-SW provavelmente desempenhou um papel fundamental na formação do depósito como um caminho efetivo para a circulação de fluidos, o que promove intensa interação fluido-rocha. No entanto, se todos os estágios de alteração hidrotermal estivessem relacionados a um único pulso de fluido, o zoneamento espacial esperado revelaria uma sequência de alteração mineral que avança de dentro para fora do conduto de fluido principal (Reed 1997). Assim, os últimos estágios de alteração estariam nas zonas distais (Melo et al. 2014). No depósito Antas Norte, no entanto, uma sequência de alterações foi caracterizada, implicando sobreimpressão de mais de um pulso de fluido.

A circulação regional de fluidos quentes e hipersalinos pelas unidades geológicas provavelmente provocou a alteração sódica e o aporte de metais lixiviados das rochas. Como resultado, esses fluidos tornaram-se metalíferos e foram responsáveis pela formação de depósitos minerais.

A alteração sódica, tendo como principal representante a albita, foi descrita como um tipo de alteração de alta temperatura ($>500^{\circ}\text{C}$) nas porções mais profundas e distais do IOCG (Hitzman, 2000; Barton e Johnson, 2004; Williams et al. 2005; Monteiro et al. 2008a) e que são tipicamente desenvolvidos em regiões periféricas aos conjuntos de alteração potássica

(Hitzman et al. 1992). A precipitação de minerais portadores de sódio (por exemplo, albita) aumentou a atividade de potássio no fluido, permitindo o desenvolvimento de zonas de alteração potássica.

Na zona de alteração potássica, a biotita é orientada paralelamente à foliação milonítica e os cristais de escapolita são deformados e apresentam extinção ondulante. Essas relações podem sugerir que a escapolita foi formada antes ou simultâneo ao cisalhamento e a biotita pode ter sido reorientada. A presença de escapolita, que contém cloro em sua estrutura, nesta associação mineral, indica que a hipersalinidade dos fluidos ainda prevaleceu durante esse estágio. Adicionalmente, a estabilidade deste mineral é incomum em temperaturas inferiores a 500-400°C (Vanko & Bishop 1982), indicando fluidos altamente quentes. Tais condições favoreceriam o transporte de metais no fluido na forma de complexos cloretados. Flutuações nas condições de fO_2 devido à interação fluido-rocha e a natureza, oxidada ou reduzida, do protólito, provavelmente, controlaram a formação de biotita em vez de feldspato potássico neste estágio (Augusto et al. 2008).

Com o avanço da alteração da alteração potássica, o fluido tornou-se depletado de K devido à formação da biotita e, em menor quantidade, feldspato potássico, enquanto as espécies de cálcio, entre outros componentes, tiveram suas concentrações relativamente aumentadas. A consequente alteração cálcica, especialmente reconhecida em rochas vulcânicas máficas, sucedeu o conjunto mineral sódico e potássico e, diferente das alterações cálcicas reconhecidas em outros depósitos IOCG em Carajás, ela é constituída, em quase sua totalidade, por hornblenda + actinolita + apatita. Monteiro et al. (2008a, 2008b) sugeriram para as alterações sódico-cálcica e cálcica temperaturas de 500-550 °C, mostrando que a alteração cálcica que ocorre no depósito Antas Norte se mantém, relativamente, com temperatura constante se comparada com as alterações iniciais do depósito.

A alteração cálcica marca, provavelmente, a mudança de regime dúctil-frágil para frágil a partir da instalação da zona de cisalhamento do depósito, mudanças físico-químicas e o início da brechação. As brechas, provavelmente, estão relacionadas a fluidos super pressurizados que causaram a degradação hidráulica das rochas hospedeiras.

As duas últimas alterações que ocorrem no depósito Antas Norte, silicificação e alteração propilítica, sugerem um gradiente físico-químico significativo, podendo estar ligadas à reativação tardia da zona de cisalhamento no Paleoproterozoico. A silicificação sobrepôs todas as alterações anteriores, resultando na formação generalizada de quartzo. Como a solubilidade da sílica diminui com a diminuição da salinidade, temperatura e pH (Fournier,

1983), esses parâmetros podem ter controlado a deposição de quartzo. A silicificação provavelmente foi influenciada pela mistura de soluções de alta e baixa salinidade, uma vez que a mistura promove significativa precipitação de quartzo (Rimstidt, 1997).

A história hidrotermal do depósito Antas Norte terminou com uma discreta alteração propilítica. Sendo a assembleia de alteração estruturalmente mais próxima da superfície e mais tardia, é composta, principalmente, por clorita-calcita-epidoto, representando um conjunto de minerais de baixa temperatura. Essa assembleia, relativamente estéril, poderia marcar um influxo de água meteórica para o sistema, com aumento da fugacidade de oxigênio e diminuição do pH ou poderia ser resultante da deposição dos sulfetos a partir de reações com consumo de H₂S e liberação de H⁺. Aparentemente, as soluções ainda eram reativas para remover Ca das rochas hospedeiras e precipitá-lo. Essas novas condições físico-químicas combinadas com a queda progressiva da temperatura provocaram a deposição de clorita, calcita e epidoto, promovendo substituição dos minerais das alterações anteriores ou formação de pequenos cristais e veios.

Deposição do Minério

A mineralização representa um estágio intermediário na evolução do sistema hidrotermal, estando associada à alteração cálcica e ao ambiente da zona de cisalhamento e representada, principalmente, por sulfetos que ocorrem em corpos maciços, brechas, veios e vênulas. Diferente dos depósitos IOCG já descritos em Carajás, o Antas Norte apresenta uma paragênese de mineralização um pouco diferente, refletindo um estado mais redutor do fluido mineralizante durante a deposição do minério, formando uma associação de calcopirita, pirrotita e pirita. Inclusões de ilmenita, esfalerita e pentlandita são comuns na zona mineralizada. Devido às características do fluido e do ambiente no qual ele precipitou, não houve formação de óxidos de ferro.

A deposição do minério pode ter sido relacionada a dois fatores: (i) decréscimo de pH, a ocorrência de pirrotita como um mineral de sulfeto estável pode sugerir que o fluido mineralizante estivesse no campo predominante de H₂S. A presença de alteração propilítica próxima à zona mineralizada também sugere a diminuição de pH, podendo ser resultante da deposição dos sulfetos a partir de reações com consumo de H₂S e liberação de H⁺; (ii) decréscimo da salinidade, devido à cristalização inicial de minerais portadores de cloro, como a escapolita, favorecendo a precipitação do cobre na forma de calcopirita. O aumento da *fO₂* e o decréscimo da temperatura talvez não explique a deposição do minério, visto que a

mineralização não se formou em paragênese com minerais de baixa temperatura e não há estágios de magnetita e hematita.

As variações observadas na mineralogia de sulfetos e óxidos que ocorrem em Antas Norte podem ser compreendidas em termos das estabilidades termodinâmicas dos principais óxidos e sulfetos de ferro e silicatos, conforme mostrado no diagrama na Figura 15. A um pH de 5 e a 300°C, o limite hematita-magnetita fica próximo ao limite de predominância entre enxofre oxidado (isto é, HSO_4^-) e enxofre reduzido (isto é, H_2S). Este limite representa outra demarcação útil entre condições hidrotermais oxidadas e reduzidas, embora dependentes do pH (Skirrow, 2022).

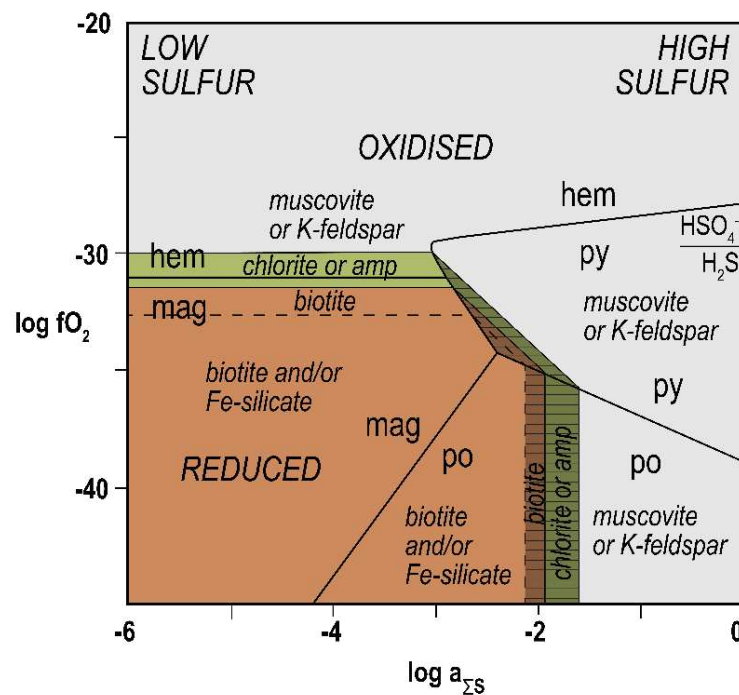


Figura 15: Diagrama de atividade da fugacidade de oxigênio ($\log f\text{O}_2$) versus atividade total de enxofre aquoso ($\log a_{\Sigma\text{S}}$) a 300°C e pH = 5, mostrando campos de estabilidade para óxidos e sulfetos de Fe juntamente com silicatos no sistema Fe-O-H-S-Si-Al-K. (Área hachurada) Condições sugeridas para a mineralização de cobre, com formação de pirrotita e pirita em condições reduzidas a intermediárias no depósito Antas Norte. (Modificada de Skirrow & Walshe (2002) e Skirrow (2022)).

A existência de ilmenita em quantidades relativamente significativas em Antas Norte pode explicar a ausência de minerais de óxidos de ferro. Buddington e Lindsley (1964), demonstraram experimentalmente que, de 550° a 1.000°C no sistema FeO-Fe₂O₃-TiO₂, existe uma solução sólida entre magnetita e ulvoespínélio, e quando esfriada em um sistema com presença de água, o componente ulvoespínélio é diretamente oxidado a magnetita e ilmenita, onde a última exsolúe ao longo dos planos da magnetita formando lamelas (Haggerty, 1976). Rodriguez-Mustafa et al. (2020), relatam esse processo de oxiexsolução no prospecto de Quince

(depósito de IOA localizado no Chile), onde há lamelas de ilmenita com textura de treliça em grãos de magnetita rica em Ti. Em Antas Norte, a ilmenita ocorre associada à mineralização formando cristais granulares, estando presente nas brechas e no preenchimento de veios e vênulas. Buddington e Lindsley (1964) descrevem ilmenita granular como sendo resultado de uma exsolução completa de ilmenita, consumindo toda magnetita. Assim, para Antas Norte, é possível assumir que, devido a inexistência de magnetita, ela tenha sido completamente substituída pela ilmenita, correspondendo a um fluido de maior profundidade e de mais alta temperatura.

A razão pela qual a ilmenita magmática-hidrotermal pode ocorrer em maior profundidade do que a magnetita hidrotermal pode ser influenciada por vários fatores, incluindo processos de oxidação e as condições termais em que esses minerais se formam. Algumas possíveis razões incluem:

1. Condições de formação: A ilmenita é mais estável em condições de alta pressão e alta temperatura, enquanto a magnetita é mais comum em condições de pressão e temperatura relativamente mais baixas. Portanto, a ilmenita pode se formar em maiores profundidades, onde as condições são mais extremas.
2. Processos de oxidação: Como mencionado, processos de oxidação desempenham um papel importante. A ilmenita é menos suscetível à oxidação do que a magnetita. Em maiores profundidades, onde as condições podem ser mais redutoras, a ilmenita pode persistir enquanto a magnetita se converte em minerais oxidados.
3. Variações nas composições dos fluidos hidrotermais: A composição dos fluidos hidrotermais que interagem com as rochas hospedeiras também pode influenciar a estabilidade da ilmenita e da magnetita. Mudanças na composição química dos fluidos em diferentes profundidades podem favorecer a formação de um mineral em detrimento do outro.
4. História geológica: A história geológica da área, incluindo eventos tectônicos e processos magmáticos, pode criar condições específicas que favoreçam a formação de ilmenita em profundidades maiores.
5. Grau de metamorfismo: O grau de metamorfismo sofrido pelas rochas hospedeiras também é um fator importante. Em maiores profundidades, onde ocorreu um metamorfismo mais intenso, as condições termais podem ser mais adequadas para a formação de ilmenita.

Skirrow (2022), afirma ser possível descrever os padrões de covariação de minerais hidrotermais em termos de variações em (a) características de oxidação-redução (redox) das associações minerais observadas, (b) a razão de óxidos de ferro para sulfetos de ferro que se relacionam principalmente com os teores de enxofre dos fluidos hidrotermais em relação ao ferro, e (c) o tempo relativo de Fe-óxidos e Cu-Fe sulfetos.

Trazendo uma subdivisão para os depósitos IOCG (Iron oxide copper-gold), os ISCG (Iron sulfide copper-gold), Skirrow (2022) ilustra (Fig. 16) uma correlação entre a mineralogia relacionada ao minério, a geoquímica de elementos menores e o cenário geológico-tectônico. O eixo x representa as abundâncias relativas observadas de sulfetos de Fe e óxidos de Fe nos depósitos. Essa proporção geralmente reflete as concentrações de enxofre no fluido em relação às abundâncias de Fe nos locais de deposição de minerais de sulfeto, bem como redox. O eixo y representa as características redox relativas interpretadas das associações minerais observadas, um dos parâmetros mais importantes na caracterização dos depósitos IOCG e ISCG. Conjuntos oxidados são definidos como aqueles em que os minerais são estáveis em valores relativamente altos de $\log fO_2$, enquanto conjuntos reduzidos são definidos como aqueles que se formam em $\log fO_2$ relativamente baixo. O eixo z representa o tempo interpretado da deposição de óxido de Fe em relação aos sulfetos de $Cu \pm Fe$. Existem dois cenários de membro final representados pelas faces traseira e frontal do cubo, respectivamente: (1) todos os sulfetos e óxidos de Fe foram depositados simultaneamente com a mineralização $Cu \pm Au$ durante a evolução de um sistema hidrotermal, e (2) todos os sulfetos e óxidos de ferro são anteriores à mineralização de $Cu \pm Au$ em eventos hidrotermais ou sedimentares separados (por exemplo, formação de ferro bandado sedimentar).

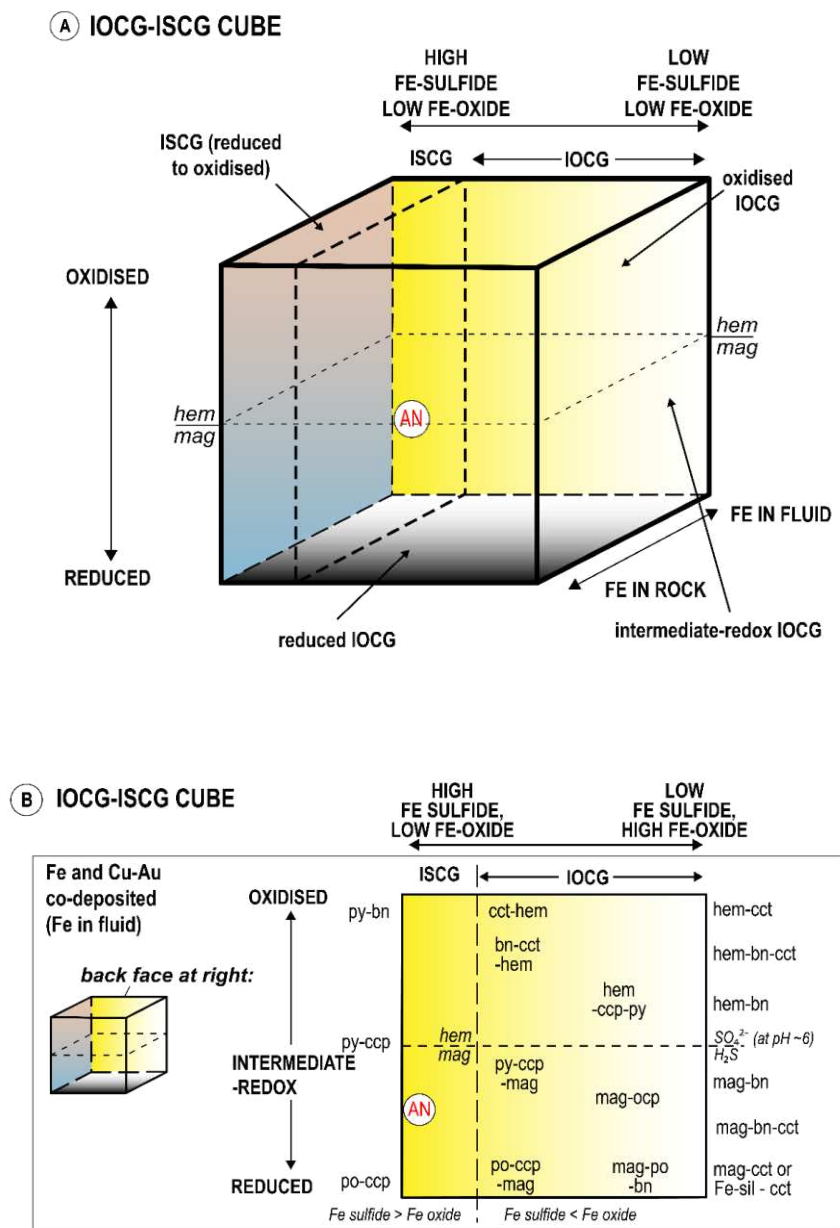


Figura 16: Subdivisão para depósitos IOCG e ISCG. (A) Representação tridimensional da mineralogia de depósitos IOCG e ISCG, mostrando volumes generalizados. Os eixos são baseados na predominância de minerais Fe-óxido versus Fe-sulfeto em corpos de minério Cu±Au (eixo x), condições de formação redox interpretadas dos principais minerais Fe-Cu-O-S (eixo y) e fonte/tempo interpretada de Fe no local de deposição do minério (eixo z); (B) Detalhe da face posterior (eixos como na Fig. 16A) mostrando conjuntos de minerais Fe-Cu-O-S para depósitos nos quais Fe-óxidos e/ou Fe-sulfetos foram amplamente co-precipitados com Cu±Au principal (“Fe in fluid”), sem formação de bifs ou mineralizações maciças de ferro. A sigla “AN” representa o posicionamento do depósito Antas Norte nos gráficos (Modificada de Skirrow (2022)).

Diante da caracterização mineralógica do minério e da constatação da ocorrência de apenas fases sulfetadas de cobre e ferro, pode-se admitir que o depósito Antas Norte (Fig. 16) faz parte do subtipo ISCG, do grande grupo de depósitos IOCG. Esse subtipo é caracterizado pela calcopirita sendo o sulfeto de cobre dominante. Os sulfetos de ferro vão variar dependendo do redox, podendo ser pirrotita, em associações mais reduzidas, ou pirita, em assembleias mais intermediárias. Skirrow (2022) ainda pontual que, no subtipo ISCG, as ocorrências de minerais

menores geralmente incluem fases que hospedam Co, Ni, As, Bi e Zn, corroborando com as ocorrências de pentlandita e esfalerita na zona mineralizada.

Geologia Estrutural e Modelo de Alterações 3D

A evolução estrutural e tectônica de Carajás é marcada por uma sucessão de eventos deformacionais sobrepostos com diferentes cinemáticas, onde as principais estruturas foram formadas e reativadas (Araújo e Maia, 1991; Pinheiro e Holdsworth, 1997a). Para os eventos de mineralização IOCG que ocorreram no Neoarqueano (~2,7 Ga e 2,5 Ga), é reconhecido um regime transpressional sinistral, com as principais direções de tensões orientadas para NE-SW, NNE-SSW ou ENE-WSW (Pinheiro e Holdsworth, 1997a, 2000; Domingos, 2009). Já para o evento de mineralização IOCG que ocorreu durante o Paleoproterozoico (1,8 Ga), é reconhecido a ocorrência de extensão generalizada e/ou transtensão dextral (Pinheiro e Holdsworth, 1997a, 2000), com a direção da extensão orientada para NE-SW ou E-W.

Haddad-Martim et al (2017) identificaram que as principais tendências, em escala regional, (Fig. 17) que controlam os depósitos Carajás IOCG estão associadas às estruturas Y e R em ambiente sinistral, e Y e P em ambiente dextral, mas com tendências secundárias, em escala de depósito, com direções que coincidem com R' e P (para o ambiente sinistral regional) e X e T (para o ambiente dextral regional). Domingos (2009) indica que as interseções entre as estruturas primárias e secundárias parecem ser relevantes, pois favorecem a percolação e formação da mineralização.

É possível identificar essa tendência estrutural sendo replicado em Antas Norte. Estando associada à Falha Carajás, caracterizada por Pinheiro & Holdsworth (1997a) e Holdsworth & Pinheiro (2000) como uma falha que teria sido formada em uma reativação tectônica sob uma cinemática sinistral, a zona de cisalhamento que aloja a mineralização de Antas Norte estaria relacionada à estrutura secundária R' sob uma cinemática dextral (Fig. 17A), podendo indicar outro período de reativação tectônica com possibilidade de abrigar a superposição de diferentes eventos hidrotermais.

Haddad-Martim et al (2017) e Huhn et al (2020) abordam que, não apenas o controle estrutural, mas os limites entre as unidades geológicas são fundamentais para formar corredores de percolação de fluidos hidrotermais relacionados a zonas de cisalhamento. Dessa forma, os controles litológicos servem como secundários para formação da mineralização. Em Antas Norte, o contato entre as unidades félsicas e máficas das rochas metavulcânicas do depósito, se

tornaria um facilitador da percolação dos fluidos que geraram tanto as alterações hidrotermais como a mineralização.

O sistema hidrotermal do depósito Antas Norte foi fortemente associado ao desenvolvimento de uma foliação milonítica S_{n+1} , relacionada ao estabelecimento ou reativação de uma zona de cisalhamento. Passchier e Trow (2005) sugerem condições de temperaturas entre 500° e 700 °C para essas zonas com foliação milonítica. Nessas zonas, a foliação é definida por anfibólio e biotita, e a granulação da matriz composta por quartzo e feldspato é intensamente diminuída através de processos de recristalização.

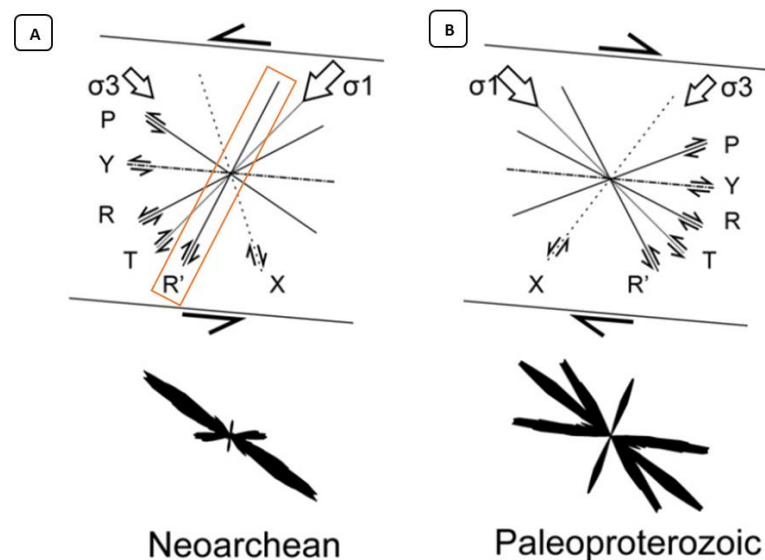


Figura 17: Relações angulares entre estruturas que se formam em cisalhamento idealizado, com terminologia de cisalhamento de Riedel. (A) Modelo sinistral inferido com o diagrama de rosetas simplificado para os depósitos IOCG Neoarqueanos em Carajás; (B) Modelo dextral inferido com o diagrama de rosetas simplificado para os depósitos IOCG Paleoproterozoicos em Carajás. Área demarcada representa a possível tendência estrutural que ocorre no depósito Antas Norte (Modificada de Haddad-Martim et al. 2017).

A modelagem 3D é responsável por representar, de forma computadorizada, os tipos litológicos, as estruturas e os dados químicos em superfície e subsuperfície, sendo de fundamental importância para a visualização e tomada de decisões em projetos de mineração. E para o depósito de Antas Norte não seria diferente. O modelo implícito, confeccionado a partir da descrição geológica dos testemunhos de sondagem e das seções geológicas, se mostrou bastante coerente ao compará-lo com a exposição das rochas na cava da mina.

Com base no modelo 3D para o depósito de Antas Norte (Fig. 12), a localização e a forma geométrica de cada zona de alteração hidrotermal, do corpo de minério e das intrusões de gabro foram identificadas. É possível entender claramente as relações espaciais entre os diferentes tipos de alteração, o corpo mineralizado e as estruturas que ocorrem na mina.

No modelo confeccionado, as zonas de alteração hidrotermal são contínuas e verticalizadas, estando associadas diretamente as composição originais das rochas que ocorrem no depósito. Os resultados deste estudo destacam também a importância da zona de cisalhamento, junto as estruturas regionais, para a compreensão das diferentes alterações que ocorrem e suas respectivas geometrias. As alterações mais expressivas são a sódica e a potássica, de caráter mais regional, onde foi proposto seus desenvolvimentos em profundidades grandes/intermediárias e, basicamente, com pouca ou nenhuma mineralização. A alteração cálcica, associada diretamente com a mineralização e relacionada à profundidade intermediária, é um importante marcador de mudança no regime estrutural, pois, devido sua proximidade com a zona de cisalhamento, é nela que observamos a brechação mais acentuada do depósito.

O minério ocorre com geometria tabular em forma de “S” e subverticalizado, associado diretamente à zona de cisalhamento com tendência NE-SW, sendo essa zona a chave para mineralização. O modelo também revela um mergulho entre 70° e 80° para sudeste do corpo de minério e um conjunto de pequenas falhas com tendência NNW-SSE que produzem deslocamentos sinistrais em algumas porções no corpo do minério. Em profundidade, o minério apresenta zona de dilatação, onde a mineralização ocorre com um plunge para sudoeste. Essa continuidade da mineralização pode significar uma conexão entre fraturas mais profundas e a zona de cisalhamento principal. A geometria da mineralização pode indicar que ela se desenvolveu em níveis profundos a intermediários, visto que os fluidos estariam sofrendo grandes pressões ficando aprisionados no conduto principal e adquirindo o formato tabular, sem ocorrer dispersão.

A comparação das características que ocorrem em Antas Norte e nos principais depósitos ao seu entorno, com as previstas no modelo conceitual proposto por Hitzman et al. (1992), permite sugerir diferentes níveis crustais de formação para cada depósito. Assim, tendo em conta a evolução dos tipos de alterações, das mineralizações e as temperaturas das associações minerais, pode-se associar Antas Norte a níveis crustais mais profundo (Fig. 18).

Compreender o alcance espacial das associações minerais das zona de alterações e a relação entre o corpo de minério e a zona de cisalhamento é de grande importância para a exploração mineral, não apenas no entorno do depósito, mas em um contexto regional. E, ao combinar, os resultados de mapeamentos geológicos, descrição de furos de sondagem com o modelo de alterações 3D, torna-se evidente que esses produtos integralizados fornecem uma referência importante para o desenvolvimento de novas descobertas.

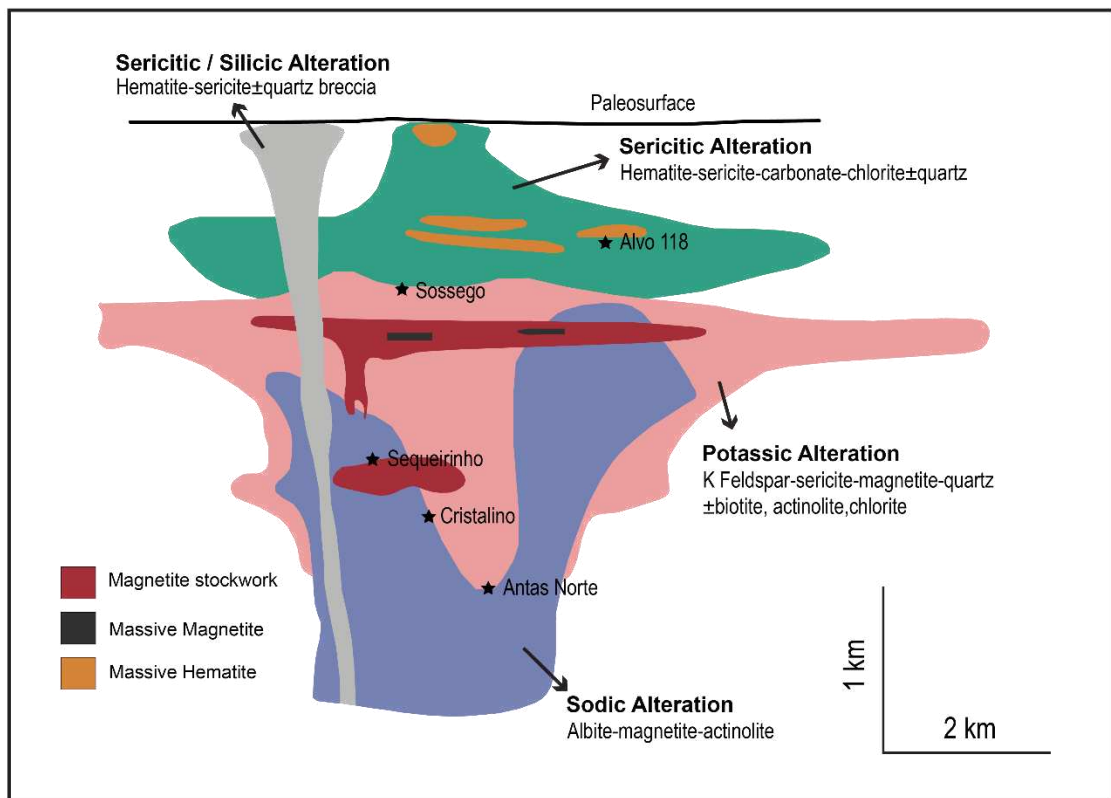


Figura 18: Modelo esquemático de distribuição das zonas de alteração hidrotermal nos depósitos do setor sudeste da Província Mineral de Carajás relacionando com seus possíveis níveis estruturais, baseado em Hitzman et al. (1992) e Williams et al. (2005).

CONCLUSÕES

A caracterização detalhada das rochas hospedeiras, dos padrões de alterações hidrotermais, da mineralização, bem como geologia estrutural e modelagem 3d realizada neste estudo forneceu informações suficientes para entendermos a evolução do depósito Antas Norte, tais informações são:

- O depósito está localizado nas proximidades da Falha Carajás (ESE-WNW), mas é especialmente controlada por uma zona de cisalhamento secundária NE-SW com cinemática dextral;
- O zoneamento espacial e temporal sugere que as alterações hidrotermais foram desenvolvidas devido a múltiplos pulsos de fluidos com reativações estruturais;
- As rochas metavulcânicas do Supergrupo Itacaiúnas representam as rochas hospedeiras do depósito e são variavelmente milonitizados e hidrotermalmente alteradas, com intensa interação fluido-rocha resultando em litótipos altamente modificados. O depósito é recortado por diques de gabros;

- A sequência de alteração hidrotermal compreende: (1) alteração sódica, representada pela albita; (2) alteração potássica, dominada por biotita e escapolita; e (3) alteração cálcica, com formação de hornblenda, actinolita e apatita generalizada, especialmente associada à mineralização. Esses processos de alteração pervasiva podem estar intrinsecamente relacionados à migração regional de fluidos hipersalinos profundos e metalíferos quentes dentro da Falha Carajás em níveis crustais relativamente profundos. A instalação da zona de cisalhamento secundária resultou no influxo de fluidos diluídos, ocasionando os últimos estágios de alterações, silicificação e propilítica.
- A zona de cisalhamento também é responsável pela mudança do regime deformacional que ocorre no depósito, evoluindo de dúctil-frágil para frágil, gerando assim desde rochas milonitizadas, até brechas e veios mineralizados, e pequenos conjuntos de falhas;
- Devido ao caráter mais redutor do fluido mineralizante, o conjunto de minério geralmente compreende calcopirita, sendo o principal mineral minério, seguido por pirrotita e pirita. Ilmenita, esfalerita, pentlandita e ouro ocorrem de maneira subordinada. A mineralização pode ocorrer de forma maciça, formando brechas ou até em formato de veio e vênulas, estando associada, principalmente, à alteração cálcica;
- Diferente dos outros depósitos do tipo IOCG que ocorrem na PMC, Antas Norte não apresenta a fase dos óxidos de ferro, podendo assim ser classificada como, ISCG, um subtipo dos depósitos IOCG que apresentam apenas sulfetos de ferro, trazendo uma nova perspectiva para a classificação dos depósitos de Cu-Au na PMC;
- A falta de óxidos de ferro que ocorre no depósito Antas Norte pode ser entendida devido ao consumo total da magnetita rica em titânio e transformada em ilmenita, a partir de reação de oxiexsolução;
- A evolução paragenética aponta para mudanças de parâmetros físico-químicos, como queda da temperatura (alteração sódica de mais alta temperatura, para alteração propilítica de mais baixa temperatura), acompanhada de diminuição da salinidade e do pH, resultando na precipitação do minério;
- As diferenças quanto às associações de minerais, condições redox e relações Cu/Fe do fluido, e os níveis crustais onde ocorreram a mineralização e as alterações hidrotermais são sugestivos de que o sistema hidrotermal/mineralizante iniciou em níveis mais profundos e terminou em níveis intermediários.
- Neste trabalho é apresentado um modelo 3D mostrando as características geométricas do depósito Antas Norte e as relações de contato entre as rochas hospedeiras e a

mineralização. Foram definidos cinco corpos principais, diferenciando-se claramente zonas mineralizadas, alterações hidrotermais e diques de gabro;

- A partir do modelo 3D foi possível entender o papel de conduto principal que a zona de cisalhamento exerceu para a formação da mineralização e para determinação de sua geometria tabular verticalizada;
- A geometria e as relações entre os depósitos minerais e a evolução estrutural em diferentes escalas devem ser cuidadosamente estudadas, para ser possível explicar a origem destes tipos de mineralização e a sua prospectividade. De acordo com o modelo proposto, a mineralização permanece aberta em profundidade, apresentando um possível plunge pada sudoeste, porém, é necessário a realização de furos mais profundos para inserir novos dados no modelo e, assim, garantir a viabilidade do projeto.
- Como uma possível aplicação prática desse estudo, podemos citar a vetorização das zonas alterações hidrotermais e da mineralização. Com a delimitação precisa dos distintos corpos, é possível definir com maior precisão os alvos da exploração mineral e estimar onde se encontram as zonas mais propícias para as ocorrências das mineralizações cupríferas.

REFERÊNCIAS

- Araújo, O. J. B., Maia, R. G. N., 1991. Serra dos Carajás, folha SB.22-ZA, Estado do Pará. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 136 p.
- Araújo, O. J. B., Maia, R. G. N., Jorge-João, X. S., Costa, J. B. S., 1988. A megaestruturação da folha Serra dos Carajás. In: Congr. Latino-Americano de Geologia, 7, Proceedings, p. 324–333.
- Arias, M., Nuñez, P., Arias, D., Gumiel, P., Castañón, C., Fuertes-Blanco, J., Martín-Izard, A., 2021. 3D Geological Model of the Touro Cu Deposit, A World-Class Mafic-Siliciclastic VMS Deposit in the NW of the Iberian Peninsula. *Minerals*, 11, 85. <https://doi.org/10.3390/min11010085>
- Augusto, R. A., Monteiro, L. V. S., Xavier, R., Souza Filho, C. R., 2008. Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geociências*, 38: 263-277.
- Avelar, V. G., Lafon, J. M., Correia Jr, F. C., Macambira, E. M. B., 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã - Província Mineral De Carajás: Novos resultados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências*, 29:453 - 460.
- Barros, C. E. M., Dall’Agnol, R., Barbey, P., Boullier A. M., 1997. Geochemistry of the Estrela Granite Complex, Carajás region, Brazil: an example of an Archaean A-type granitoid. *Journal of South American Earth Sciences*, 10: 321- 330.
- Barros, C. E. M., Macambira, M. J. B., Barbey, P., Scheller, T., 2004. Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: Implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 34:531–538.
- Barton, M. D., 2013. Iron Oxide(-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition (Vol. 13, pp. 515–541)*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2>
- Barton, M. D., Johnson, D. A., 2004. Footprints of Fe-oxide(-Cu-Au) systems. *SEG 2004: Predictive Mineral Discovery Under Cover*. Centre for Global Metallogeny, Spec. Pub. 33, The University of Western Australia, 112-116.
- 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, Sn) Breves, Carajás. In: Marini OJ, Queiroz ET, Ramos BW (eds) *Caracterização do depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DMNP-CT-mineral / FINEPADIMB, pp 339–389.
- Buddington, A. F., Lindsley, D. H., 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents: *Journal of Petrology*, v. 5, p. 310–357.

Case, G., Blenkinsop, T., Chang, Z., Huizenga, J. M., Lilly, R., McLellan, J., 2017. Delineating the structural controls on the genesis of iron oxide–Cu–Au deposits through implicit modelling: a case study from the el group, cloncurry district, australia. Geological Society, London, Special Publications, [S.L.], v. 453, n. 1, p. 349-384. Geological Society of London. <http://dx.doi.org/10.1144/sp453.4>

Corriveau, L., 2007. Iron oxide copper-gold deposits: A Canadian perspective. In W. D. Goodfellow (Ed.), Mineral deposits in Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces and exploration methods, pp. 307–328.

Craveiro, G. S., Villas, R. N., Costa Silva, A. R., 2012. Depósito Cu-Au Visconde, Carajás (PA): geologia e alteração hidrotermal das rochas encaixantes. Revista Brasileira de Geociências, 42(3): 453-470.

Craveiro, G. S., Xavier, R. P., Villas, R. N. N., 2019. The Cristalino IOCG deposit: an example of multi-st age events of hydrothermal alteration and copper mineralization. Brazilian Journal of Geology, 49(1): 1-18.

Docegeo, 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: Cong. Bras. Geol., 35, SBG, p. 11 – 54.

Domingos, F. H. G., 2009. The Structural Setting of the Canaã dos Carajás Region and Sossego-Sequeirinho Deposits, Carajás Brazil. Doctor of Philosophy thesis. University of Durham, Durham, pp. 483.

Feio, G. R. L., Dall’Agnol, R., Dantas, E. L., Macambira, M. J. B., Gomes, A. C. B., Sardinha, A. S., Oliveira, D. C., Santos, R. D., Santos, P. A., 2012. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites?. Lithos, 151:57–73.

Feio, G. R. L., Dall’Agnol, R., Dantas, E. L., Macambira, M. J. B., Santos, J. O. S., Althoff, F. J., Soares, J. E. B., 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. Precambrian Research, 227:157–185.

Ferreira Filho, C. F., Cançado, F., Correa, C., Macambira, E. M. B., Junqueira-Brod, T. C., Siepierski, L., 2007. Mineralizações estratiformes de PGE-Ni associadas a complexos acamadados em Carajás: os exemplos de Luanga e Serra da Onça. In: Rosa-Costa L.T., Klein E.L., Viglio E.P. (eds.). Contribuições à geologia da Amazônia. SBG-Núcleo Norte, Belém, p. 1-14.

Fournier, R. O., 1983. Active hydrothermal systems as analogues of fossil systems: In: Eaton, G., (eds.). The Role of Heat in the Development of Energy and Mineral Resources in the Northern Basin and Range Province. Geothermal Resources Council Special Report No. 13, p. 263–284.

Galarza, M. A., Macambira, M. J. B. Moura, C. A. V., 2003. Geocronologia Pb-Pb e Sm–Nd das rochas máficas do depósito Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA). In: 7º Simpósio de Geologia da Amazônia, [CD-ROM].

- Garcia, V. B., Schutesky, M. E., Oliveira, C. G., Whitehouse, M. J., Hühn, S. R. B., Augustin, C. T., 2020. The Neoproterozoic GT-34 Ni deposit, Carajás mineral Province, Brazil: An atypical IOCG-related Ni sulfide mineralization, *Ore Geology Reviews*, Volume 127, 103773, ISSN 0169-1368, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103773>
- Grainger, C. J., Groves, D. I., Tallarico, F. H. B, Fletcher, I. R., 2008. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralization. *Ore Geology Reviews*, 33: 451-489.
- Groves, D. I., Bierlein, F. P., Meinert, L. D., Hitzman, M. W., 2010. Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits: *Economic Geology*, v. 105, p. 641-654.
- Haddad-Martim, P. M., Souza Filho, C. R., Carranza, E. J. M., 2017. Spatial analysis of mineral deposit distribution: A review of methods and implications for structural controls on iron oxide-copper-gold mineralization in Carajás, Brazil, *Ore Geology Reviews*, Volume 81, Part 1, Pages 230-244, ISSN 0169-1368, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.038>
- Haggerty, S., 1976. Opaque mineral oxides in terrestrial igneous rocks: Mineralogical Society of America, Short Course Notes, v. 3, p. 101–300.
- Haynes, D. W., 2000. Iron oxide copper (-gold) deposits: their position in the deposit spectrum and modes of origin. In *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*, Volume 1, pp. 71–90. Australian Mineral Foundation.
- Hirata, W. K., Rigon, J. C., Kadekaru, K., Cordeiro A. A. C., Meireles, E. A., 1982. *Geologia Regional da Província Mineral de Carajás: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1st, Belém, Abstracts, p. 100-110.
- Hitzman, M. W., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when and why? In T. M. Porter (Ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*, Volume 1, pp. 9–25. Australian Mineral Foundation.
- Hitzman, M. W., Oreskes, N., Einaudi, M. T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58: 241–287.
- Holdsworth, R., Pinheiro, R., 2000. The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. *Journal of Structural Geology* 22: 1105 - 1123.
- Huang, X-W., Beaudoin, G., 2019. Textures and Chemical Compositions of Magnetite from Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) and Kiruna-Type Iron Oxide-Apatite (IOA) Deposits and Their Implications for Ore Genesis and Magnetite Classification Schemes. *Economic Geology*; 114 (5): 953–979. doi: <https://doi.org/10.5382/econgeo.4651>

Hühn, S. R. B., Silva, A. M., Ferreira, F. J. F., Braitenberg, C., 2020. Mapping New IOCG Mineral Systems in Brazil: The Vale do Curaçá and Riacho do Pontal Copper Districts. *Minerals*, 10, 1074. <https://doi.org/10.3390/min10121074>

Hühn, S. R. B., Souza C. I. J., Albuquerque, M. C., Leal, E. D., Brustolin, V., 1999a. Descoberta do depósito Cu (Au) Cristalino: Geologia e mineralização associada região da Serra do Rabo - Carajás - PA. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Boletim de Resumos, pp 140–143.

Hühn, S. R. B., Macambira, M. J. B., Dall’Agnol, R., 1999b. Geologia e geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás-PA. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Boletim de Resumos, p. 463-466.

Hühn S. R. B., Nascimento, J. A. S., 1997. São os depósitos cupríferos de Carajás do tipo Cu-Au-U-ETR?. In: M.L. Costa & R.S. Angélica (eds.) Contribuições à Geologia da Amazônia. FINEP, SGB-NO, p.: 143-160.

Kampmann, T. C., Stephens, M. B., Weihed, P., 2016. 3D modelling and sheath folding at the Falun pyritic Zn-Pb-Cu-(Au-Ag) sulphide deposit and implications for exploration in a 1.9 Ga ore district, Fennoscandian Shield, Sweden. *Miner. Depos.* 51, 665–680.

Li, B., Peng, Y., Zhao, X., Liu, X., Wang, G., Jiang, H., Wang, H., Yang, Z., 2022. Combining 3D Geological Modeling and 3D Spectral Modeling for Deep Mineral Exploration in the Zhaoxian Gold Deposit, Shandong Province, China. *Minerals*, 12, 1272. <https://doi.org/10.3390/min12101272>

Lindenmayer, Z. G., Teixeira, J. B. G., 1999. Ore genesis at the Salobo copper deposit, Serra dos Carajás. In: Silva M. G., Misi A. (eds.). *Base Metal Deposits of Brazil*. MME/CPRM/DNPM, Belo Horizonte, p. 33-43.

Lindenmayer, Z. G., Pimentel, M. M., Ronchi, L. H., Althoff, F. J., Laux, J. H., Araújo, J. C., Fleck, A., Baecker, C. A., Carvalho, D. B., Nowatzki, A. C., 2001b. Geologia do depósito de Cu-Au de Gameleira Serra dos Carajás, Pará. In: Jost H., Brod J.A., Quieroz E.T. (eds.) *Caracterização de depósitos auríferos em distritos mineiros brasileiros*. Brasília, ADIMB-DNPM, p. 79-139.

Lindenmayer, Z. G., 2003. Depósito de Cu–Au do Salobo, Serra dos Carajás: Uma revisão. In: L.H. Ronchi and F.J. Althoff (Eds.), *Caracterização e modelamento de depósitos minerais*. Editora Unisinos, São Leopoldo, 69–98.

Lindenmayer, Z. G., Fleck, A., Gomes, C. H., Santos, A. B. S., Caron, R., Paula, F. C., Laux, J. H., Pimental, M. M., Sardinha, A. S., 2005. Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará. In: Marini OJ, Queiroz ET, Ramos BW (eds) *Caracterização do depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DMNPCT-mineral/FINEP-ADIMB, pp 157–225.

Macambira, E. B. M., Ferreira Filho, C. F., 2005. Exploration and origin of stratiform PGE mineralization in the Serra da Onça layered complex, Carajás Mineral Province, Brazil. In: 10th International Platinum Symposium Extended Abstract, Oulu.

- Macambira, E. B. M., Ferreira Filho, C. F., 2002. Fracionamento magmático dos corpos máfico ultramáficos da Suíte Intrusiva Cateté – sudeste do Pará. In: Klein EL, Vasquez ML, Rosa-Costa LT (Eds) Contribuições à geologia da Amazônia. Belém, SBG-Núcleo Norte, pp 105-114.
- Machado, N., Krough, T. E., Lindenmayer, Z. G., 1991. U–Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás Area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Res.* 49, 1–26.
- Mansur, E. T., Ferreira Filho, C. F., Oliveira, D. P., 2020. The Luanga deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: Different styles of PGE mineralization hosted in a medium-size layered intrusion. *Ore Geology Reviews*, 118: 103340.
- Mansur, E. T., Ferreira Filho, C. F., 2016. Magmatic structure and geochemistry of the Luanga Mafic-Ultramafic Complex: Further constraints for the PGE-mineralized magmatism in Carajás, Brazil. *Lithos* doi:10.1016/j.lithos.2016.09.036.
- Martin-Izard, A., Arias, D., Arias, M., Gumiel, P., Sanderson, D.J., Castañón, C., Lavandeira, A., Sanchez, J., 2015. A new 3D geological model and interpretation of structural evolution of the world-class Rio Tinto VMS deposit, Iberian Pyrite Belt (Spain). *Ore Geol. Rev.* 71, 457–476.
- Marschik, R., Mathur, R., Ruiz, J., Leveille, R.A., Almeida, A-J., 2005. Late Archean Cu-Au-Mo mineralization at Gameleira and Serra Verde, Carajás Mineral Province, Brazil: constraints from Re-Os molybdenite ages. *Mineralium Deposita*, 39: 983–991.
- Melo, G. H. C., Monteiro, L. V. S., Moreto, C. P. N., Xavier, R. P., Silva, M. A. D., 2014. Paragenesis and evolution of the hydrothermal Bacuri iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Province (PA). *Brazilian Journal of Geology*, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 73-90. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.5327/z2317-4889201400010007>
- Melo, G. H. C., 2011. Contexto geológico e evolução metalogenética do depósito de cobre Bacuri, Província Mineral de Carajás. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 66p.
- 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. In *Mineralium Deposita* (Vol. 43, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0121-3>
- 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.
- Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Souza Filho, C. R., Augusto, R. A., 2007. Aplicação de isótopos estáveis ao estudo dos padrões de distribuição das zonas de alteração hidrotermal associados ao sistema de óxido de ferro-cobre-ouro Sossego, Província Mineral de Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geoquímica. Atibaia, Sociedade Brasileira de Geoquímica v. 8, CDROM.

Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Creaser, R. A., Dufrane, S. A., Melo, G. H. C., Delinardo Silva, M. A., Tassinari, C. C. G., Sato, K., 2015a. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajas Province, Brazil. *Mineralium Deposita*, 50(5):517-546. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0549-9>

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., 2015b. Neoproterozoic and Paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossego deposit, Carajas Province, Brazil, Re-Os and U-Pb geochronological evidence. *Economic Geology*, 110(3):809-835. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.3.809>

Moreto, C. P. N., 2013. Geocronologia U-Pb e Re-Os aplicada à evolução metalogenética do Cinturão Sul do Cobre da Província Mineral de Carajás. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UNICAMP, 216 p.

Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Amaral, W. S., Santos, J. S. S., Juliani, C., Souza Filho, C. R., 2011. Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. *Mineralium Deposita* 46:789–811. doi: 10.1007/s00126-011-0352-9.

Nogueira, A. C. R., Truckenbrodt, W., Pinheiro, R. V. L., 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. *Bol. Mus. Par. Em. Goeldi, Ciência da Terra*, 7: 177-277.

Oliveira, C. G., Santos, R. V., Lafon, J. M., 1994. Variação da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ durante a evolução da zona de cisalhamento aurífera de Diadema, Sudeste do Pará. In: 38 Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú. Resumos Expandidos. 2: 415-416p.

Oz Minerals, 2020. Antas North. Mineral Resource and Ore Reserve Statement and Explanatory Notes.

Oz Minerals, 2022. Pedra Branca. Mineral Resource and Ore Reserve Statement and Explanatory Notes.

Passchier, C. W., Trouw, R. A. J., 2005. *Microtectonics*. Berlin; New York, Springer.

Pestilho, A. L. S., Monteiro, L. V. S., Melo, G. H. C., Moreto, C. P. N., Juliani, C., Fallick, A. E., Xavier, R. P., 2020. Stable isotopes and fluid inclusion constraints on the fluid evolution in the Bacaba and Castanha iron oxide-copper-gold deposits, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 121: 103738.

Pidgeon, R. T., Macambira, M. J. B., Lafon, J. M., 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás province, Brazil: Evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chem. Geol.* 166, 159–171.

Pimentel, M. M., Lindenmayer, Z. G., Laux, J. H., Armstrong, R., Araújo, J.C., 2003. Geochronology and Nd geochemistry of the Gameleira Cu–Au deposit, Serra dos Carajás, Brazil: 1.8–1.7 Ga hydrothermal alteration and mineralization. *Journal of South American Earth Science*, 15:803-813.

- Pinheiro, R. V. L., Kadekaru, K., Soares, A. V., Freitas, C., Ferreira, S. N., Matos, F. M. V., 2013. Carajás, Brazil - a short tectonic review. In: XIII Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, p. 1086–1089.
- Pinheiro, R. V. L., Holdsworth, R. E. 1997a. Reactivation of Archean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society*, 154: 99-103.
- Pinheiro, R. V. L., Holdsworth, R. E., 2000. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cráton Amazônico. Pará. *Rev. Bras. Geociências* 30, 597–606.
- Pollard, P. J., Taylor, R. G., Peters, L., Matos, F., Freitas, C., Saboia, L., Huhn, S. R. B., 2018. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of Archean iron oxide Cu-Au and Paleoproterozoic granite-related Cu-Au deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil: implications for genetic models. *Miner. Deposita* 1–18.
- Reed, M. H., 1997. Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition. In: Barnes H.L. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Wiley, New York, p. 303–365.
- Réquia, K., Stein, H., Fontboté, L., 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.
- Rigon, J. C., Munaro, P., Santos, L. A., Nascimento, J. A. S., Barreira, C. F., 2000. Alvo 118 copper–gold deposit: geology and mineralization, Serra dos Carajás, Pará, Brazil. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro. SBG, Abstract Volume, [CD-ROM].
- Rimstidt, J. D., 1997. Gangue mineral transport and deposition. In: Barnes H.L. (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 3rd ed., New York, Wiley, p. 435–487.
- Roberts, D. E., Hudson, G. R. T., 1983. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia. *Economic geology*, 78:799–822.
- Rodriguez-Mustafa, M. A., Simon, A. C., Real, I., Thompson, J. F. H., Bilenker, L. D., Barra, F., Bindeman, I., Cadwell, D., 2020. A Continuum from Iron Oxide Copper-Gold to Iron Oxide-Apatite Deposits: evidence from Fe and O stable isotopes and trace element chemistry of magnetite. *Economic Geology*, [S.L.], v. 115, n. 7, p. 1443-1459. Society of Economic Geologists. <http://dx.doi.org/10.5382/econgeo.4752>
- Santos, J. O. S., 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central, in Bizzi, L.A., ed, *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília, CPRM, p. 169-226.
- Sardinha, A. S., Barros, C. E. M., Krymsky, R., 2006. Geology, geochemistry, and U-Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 20:327–339.

Simon, A. C., Knipping, J., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., Bilenker, L., Childress, T., 2018. Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) and iron oxide copper-gold (IOCG) deposits form by a combination of igneous and magmatic-hydrothermal processes: Evidence from the Chilean iron belt: Society of Economic Geologists, Special Publication 21, p. 89–114.

Siepierski, L., 2016. Geologia, petrologia e potencial para mineralizações magmáticas dos corpos máficoultramáficos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás, Brasil. PhD Thesis, Universidade de Brasília.

Sillitoe, R. H., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787–812. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0379-7>

Silva, C. M. G., Villas, R. N., 1998. The Águas Claras Cu-sulfide ± Au deposit, Carajás region, Pará, Brazil: geological setting, wall-rock alteration and mineralizing fluids. *Revista Brasileira de Geociências*, 28: 315–326.

Skirrow, R. G., 2022. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification. *Ore Geology Reviews*, Volume 140, 104569, ISSN 0169-1368, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104569>

Skirrow, R. G., Murr, J., Schofield, A., Huston, D. L., Van der Wielen, S., Czarnota, K., Coghlan, R., Hight, L. M., Connolly, D., Doublier, M., Duan, J., 2019. Mapping iron oxide Cu-Au (IOCG) mineral potential in Australia using a knowledge-driven mineral systems-based approach. *Ore Geology Reviews*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103011>

Skirrow, R. G., Walshe, J. L., 2002. Reduced and oxidized Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek Inlier, Australia: An integrated geologic and chemical model. *Economic Geology*, 97(6). <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.6.1167>

Souza, S. R. B., Macambira, M. J. B., Sheller, T., 1996. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúnas (Serra dos Carajás, PA); implicações estratigráficas. In: 5º Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, p. 380-383.

Tallarico, F. H. B., Figueiredo, B. R., Groves, D. I., Kositcin, N., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R., 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*, v. 100th Anni, p. 7–28.

Tallarico, F. H. B., McNaughton, N. J., Groves, D. I., Fletcher, I. R., Figueiredo, B. R., Carvalho, J. B., Rego, J. L., Nunes, A. R., 2004. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. *Mineralium Deposita*, 39: 68–86.

Tallarico, F. H. B., 2003. O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, 229 p.

Tazava, E., Oliveira, C. G. 2000. The igarapé Bahia Au-Cu-(REE-U) deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. In: Porter, T.M. (eds.) *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, p. 203–212.

- Teixeira, A. S., Ferreira Filho, C. F., Giustina, M. E. S. D., Araujo, S. M., Silva, H. H. A. B., 2015. Geology, petrology and geochronology of the Lago Grande layered complex: Evidence for a PGE-mineralized magmatic suite in the Carajás Mineral Province, Brazil. *J S American Earth Sci* 64:116-138.
- Teixeira, W., Hamilton, M. A., Girardi, V. A. V., Faleiros, F. M., Ernst, R. E., 2019. U-Pb baddeleyite ages of key dyke swarms in the Amazonian Craton (Carajás/Rio Maria and Rio Apa areas): Tectonic implications for events at 1880, 1110 Ma, 535 Ma and 200 Ma. *Precambrian Research*, 329: 138-155.
- 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.
- Trendall, A. F., Basei, M. A. S., De Laeter, J. R., Nelson, D. R., 1998. SHRIMP U-Pb constraints on the age of the Carajás formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. *J. South Am. Earth Sci.* 11: 265-277.
- Vale, 2022. Formulário de Relatório Anual 20-F; Comissão de Valores Mobiliários dos Estados Unidos.
- Vanko, D. A., Bishop, F. C., 1982. Occurrence and origin of marialitic scapolite in the Humboldt Lopolith, N.W. Nevada. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 81:277-289.
- Vasquez, L. V., Rosa-Costa, L. R., Silva, C. G., Ricci, P. F., Barbosa, J. O., Klein, E. L., Lopes, E. S., Macambira, E. B., Chaves, C. L., Carvalho, J. M., Oliveira, J. G., Anjos, G. C., Silva, H. R., 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas–SIG: Texto Explicativo dos Mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belem: CPRM.
- Vollgger, S. A., Cruden, A. R., Ailleres, L., Cowan, E. J., 2015. Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia, *Ore Geology Reviews*, Volume 69, Pages 268-284, ISSN 0169-1368, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.020>
- Volp, K. M., 2005. The Estrela copper deposit, Carajás, Brazil. Geology and implications of a Proterozoic copper stockwork. In: Mao J, Bierlein FP (eds) *Mineral deposit research: meeting the global challenge*. Springer, Berlin, pp 1085–1088.
- Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N. H. S., Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distributions and possible modes of origin. *Economic Geology*, 100, 371–405.
- Winter, C. J., 1994. Geology and base-metal mineralization associated with Archean iron-formation in the Pojuca Corpo Quatro Deposit, Carajás, Brazil. University of Southampton.
- Wirth, K. R., Gibbs, A. K., Olszewski, W. J. Jr., 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará Group and Serra dos Carajás granite, Pará, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. 16: 195-200.

Xavier, R. P., Monteiro, L. V. S., Souza Filho, C. R., Torresi, I., Carvalho, E. R., Dreher, A. M., Wiedenbeck, M., Trumbull, R. B., Pestilho, A. L. S., Moreto, C. P. N., 2010. The iron oxide copper– gold deposits of the Carajás Mineral Province, Brazil: an updated and critical review. In: Porter TM (ed) Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective. Australian Miner. Fund, Adelaide, Vol 3, pp. 285-306.

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., Silva, F. H. F., 2012. The 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.

Xavier, R. P., Moreto, C. P. N., Melo, G. H., Toledo, P., Hunger, R., Delinardo da Silva, M. A., Faustinoni, J., Lopes, A., Monteiro, L. V. S., Previato, M., Jesus, S. S. 2017. Geology and metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic copper systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil. In: Proceedings of the 14th Biennial SGA Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Quebec, p. 899-902.

Zucchetti, M., 2007. Rochas máficas do Grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA. Tese de Doutorado, UFMG, 165p.