

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

O depósito de cobre AQW2, região do Aquiri, Província Mineral de Carajás, Pará: *timing* da mineralização IOCG e história evolutiva

RODRIGO OLIVEIRA DE ARAÚJO MABUB

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências (Recursos Minerais e Hidrogeologia) para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Recursos Minerais e Meio Ambiente.

Orientadora: Profa. Dra. Lena Virgínia Soares Monteiro

**São Paulo
2023**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:

Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Mabub, Rodrigo Oliveira de Araújo

O depósito de cobre Aqw2, região do Aquiri, Província Mineral de Carajás, Pará: *timing* da mineralização IOCG e história evolutiva. Rodrigo Oliveira de Araújo Mabub; orientadora Lena Virgínia Soares Monteiro, 2023.
68 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geociências (Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2023.

1. IOCG. 2. Metalogênese. 3. Província Carajás. 4. Geocronologia.
5. Sistema Mineral.
I. Monteiro, Lena Virgínia Soares, orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

O depósito de cobre AQW2, região do Aquiri, Província Mineral de Carajás, Pará: *timing* da mineralização IOCG e história evolutiva

RODRIGO OLIVEIRA DE ARAÚJO MABUB

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lena Virgínia Soares Monteiro

Dissertação de Mestrado

Nº 926

COMISSÃO JULGADORA

Dr^a. Lena Virgínia Soares Monteiro

Dra. Juliana Charão Marques

Dr. Roberto Perez Xavier

SÃO PAULO
2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me acompanhar todos os dias, guiando meus passos nas decisões fáceis e difíceis que precisei tomar. Agradeço aos meus amados pais Brenno (*in memoriam*) e Míriam Mabub, exemplos de dedicação e superação em todos os sentidos. Aos meus irmãos geólogos Brunno e Ricardo Mabub, pelas discussões e incentivos e as minhas irmãs Mônica e Márcia Mabub.

Minha gratidão especial à profa. Dra. Lena Virginia Soares Monteiro, minha orientadora, por todas as discussões, idas a campo e paciência nessa jornada, sem sua orientação e apoio nada disso seria possível.

Ao Bruno Vieira Ribeiro (*Curtin University*, Austrália) e Ticiano José Saraiva dos Santos (UNICAMP), que possibilitaram a aquisição dos dados geocronológicos e ao Marco Delinardo e Luiz Dutra pela ajuda em várias etapas do estudo (da preparação de amostras ao tratamento de dados químicos) o meu mais sincero agradecimento.

Um obrigado especial ao geólogo, amigo e ex-gestor Fernando Martins Vieira Matos “Fernandão” pelas inúmeras discussões e orientação. O seu amor incondicional à Exploração Mineral é contagiante.

À família JUST AQW, pelos momentos mais alegres vividos em campo na região Oeste de Carajás: de Água Azul do Norte a Vila Lindoeste foram momentos e aventuras inesquecíveis.

Dedico essa tese a minha esposa Lívia Mabub e às minhas amadas filhas Ágatha e Isadora Mabub.

“Para tudo há uma ocasião certa;
há um tempo certo para cada
propósito debaixo do céu”

Eclesiastes 3:1

RESUMO

Mabub, R.O. de A. 2023. O depósito de cobre AQW2, região do Aquiri, Província Mineral de Carajás, Pará: timing da mineralização IOCG e história evolutiva. [Dissertação de Mestrado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 68 p.

A depósito AQW2 localiza-se na área de Aquiri, na porção oeste da Província Mineral de Carajás. É hospedado pela sequência vulcano-sedimentar atribuída ao Grupo Aquiri, coeva ao Supergrupo Itacaiúnas (ca. 2,73 a 2,76 Ga) e por extensos corpos gabroicos. Estas unidades têm geometria sigmoidal e estão em contato tectônico com gnaisses mesoarqueanos e granitoides. A mineralização de cobre-ouro do depósito AQW2 foi controlada por uma zona de cisalhamento rúptil-dúctil anastomosada, com direção E-W preferencial, alojada ao longo da tendência principal NW-SE. A evolução da alteração hidrotermais foi acompanhada pelo desenvolvimento de foliação milonítica e múltiplos estágios de brechação associados à sobrepressão de fluidos canalizados na zona de falha. As brechas hidrotermais, por sua vez, apresentam fragmentos orientados e achatados em uma matriz hidrotermal formada durante os estágios de alteração hidrotermal sódica-potássica (Na-K), potássico-cálcico-férrica (K-Ca-Fe) e férrica (Fe-P) e sódica (Na). A alteração precoce (K)-Ca-Fe foi formada em 2701 ± 50 Ma, conforme indicado por datação LA-ICP-MS U-Pb da apatita (I). O principal estágio de mineralização do cobre foi associado a um forte metassomatismo de Fe-(P), resultando em brechas ricas em magnetita-(apatita). O estágio de mineralização mais significativo ocorre preferencialmente nas zonas mais deformadas geralmente com magnetita associada, na matriz de brechas hidrotermais e ao longo da foliação. Calcopirita e bornita subordinadas associam-se com allanita, monazita, torita, parisita, curita, magnetita e apatita. A assinatura geoquímica do minério mostra a associação típica de Fe-Cu-Au-ETRL-P-U observada em depósitos IOCG. O *timing* do estágio principal de mineralização no depósito AQW2 é limitado pelas idades U-Pb concordantes de apatita (II) e (III) em 2591 ± 65 Ma (MSWD = 1,6) e 2527 ± 27 Ma (MSWD = 1,1), respectivamente. Essas idades relacionam o principal evento metalogenético do depósito AQW2 com aqueles também registrados nos depósitos IOCG do Cinturão Norte do Cobre na Província de Carajás. Elementos traços em apatita (I) a (III) indicam diminuição dos conteúdos de Σ LREE e aumento das razões Sr/Y, sugerindo mecanismos de dissolução-precipitação durante a precipitação do minério. A alteração sódica foi principalmente distal à principal zona de mineralização Cu-Au, resultando em lixiviação de metais dos gabros e formação de albitos rosados. Uma idade U-Pb obtida em titanita pelo método LA-ICP-MS de 2502 ± 14 Ma (MSWD = 1.3) restringe o *timing* de alteração sódica. Fluidos ricos em Cl-Fe provavelmente exsolvidos de magmas máficos podem estar relacionados à evolução hidrotermal no depósito AQW2. O evento hidrotermal mais tardio associados a estruturas rúpteis responsável pela alteração cálcica e mineralização tardia de cobre foi formado no Paleoproterozoico, como indicado por idade U-Pb na apatita tardia (IV) (2295 ± 65 Ma). O conjunto de dados obtido para o depósito AQW2 revela uma longa evolução intimamente ligada aos eventos hidrotermais registrados no Cinturão de Cobre do Norte, como parte do sistema IOCG de larga escala na Província Mineral de Carajás.

Palavras-chave: Carajás, IOCG, metalogênese, cobre, geocronologia, apatita

ABSTRACT

Mabub, R.O. de A. 2023. O depósito de cobre AQW2, região do Aquiri, Província Mineral de Carajás, Pará: timing da mineralização IOCG e história evolutiva. [Master's Thesis], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 68 p.

The AQW2 deposit is located in the Aquiri area, in the western portion of the Carajás Mineral Province. It is hosted by a volcanic-sedimentary sequence attributed to the Aquiri Group, coeval to the Itaciaúnas Supergroup (ca. 2.73 to 2.76 Ga) and extensive gabbroic bodies. These units have a sigmoidal geometry and are enveloped by Mesoarchean gneisses and granitoids. The copper-gold mineralization of the AQW2 deposit was controlled by an anastomosed brittle-ductile shear zone, with a preferred E-W direction, lodged along the NW-SE main trend. The hydrothermal alteration stages were synchronous to the mylonitic foliation and multiple brecciation stages associated with fluid overpressure in the fault zone. Hydrothermal breccias have oriented and flattened fragments in a hydrothermal matrix formed during (Na)-K (biotite-scapolite), (K)-Ca-Fe (Cl-K-hastingsite-magnetite-apatite), Fe-(P) (magnetite-apatite and magnetite-grunerite-almandine) and Na (albite-titanite) alteration stages. The early (K)-Ca-Fe alteration was formed at 2701 ± 50 Ma, as indicated by the LA-ICP-MS U-Pb apatite (I). The main copper-mineralization stage was linked to strong Fe-(P) metasomatism, resulting in magnetite-(apatite)-rich breccias. The most significant mineralization stage occurs preferentially in strongly deformed zones, usually associated with magnetite in breccia matrix, within foliation planes and along stringers. Chalcopyrite and minor bornite occur associated with allanite, monazite, thorite, parisite, curite, magnetite, and apatite. The geochemical ore signature (Fe-Cu-Au-LREE-P-U) is typical of IOCG deposits. The timing of the main mineralization stage at AQW2 deposit is constrained by concordant U-Pb ages of 2591 ± 65 Ma (MSWD = 1.6) and 2527 ± 27 Ma (MSWD = 1.1) obtained from apatite (II) and (III), respectively. These ages link the main metallogenetic event at the AQW2 deposit with those also recorded in the IOCG deposits of the Northern Copper Belt in the Carajás Province. Apatite (I) to (III) records decreased Σ REE contents and increased Sr/Y ratios, suggesting a dissolution-precipitation mechanism during ore precipitation. The Na alteration represented by the formation of pinkish albite in the gabbroic bodies is commonly distal to the main Cu-Au mineralization zones. A U-Pb LA-ICP-MS titanite age of 2502 ± 14 Ma (MSWD = 1.3) constrains the sodic alteration timing. Ferrous chloride fluids likely exsolved from mafic magmas may be related to the hydrothermal evolution at the AQW2 deposit. Late hydrothermal events associated with brittle structures (e.g., calcic alteration, late albitization, late copper mineralization) were formed in successive hydrothermal events as indicated by the late apatite (IV) (2295 ± 65 Ma) U-Pb ages. Overall, the dataset obtained for the AQW2 deposit unravels a long-term evolution closely connected to the hydrothermal events recorded in the Northern Copper Belt as part of the large-scale IOCG system in the Carajás Mineral Province.

Keywords: Carajás, IOCG, metallogenesis, copper, geochronology, apatite

Sumário

1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	04
3. LOCALIZAÇÃO DO DEPÓSITO AQW2	04
4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL: A PROVÍNCIA CARAJÁS	05
Manuscript: <i>Timing of ore-formation and overprinting events in the AQW2 Iron Oxide-Copper-Gold Deposit, Carajás Province: Constraints from LA-ICP-MS U-Pb apatite and titanite ages</i>	13
ABSTRACT	13
1. INTRODUCTION	15
2. GEOLOGICAL SETTING OF THE CARAJÁS MINERAL PROVINCE	18
3. METHODS	23
3.1. Petrography, optical cathodoluminescence and SEM analysis	23
3.2. TIMA mapping	23
3.3. Apatite U –Pb and trace element	24
3.4 Titanite U –Pb analyses	25
4. RESULTS	26
4.1 Geological units and host rocks of the AQW2 deposit	26
4.2. The AQW2 Cu-Au deposit: hydrothermal and tectonic facies	29
4.3. Main copper-gold mineralization (I)	36
4.4. Late Ca alteration and Cu-Au mineralization (II)	38
4.5. Apatite Texture and Paragenesis	38
4.6. Trace-element and U-Pb apatite dating	43

4.7. LA-ICP-MS titanite age	48
5. DISCUSSIONS	50
5.1. Zoning of hydrothermal alteration and superimposition of mineralizing events	50
5.2. Apatite chemistry and timing of alteration-mineralization	51
6. CONCLUSIONS	54
REFERENCES	57
Supplementary material A – LA-ICP-MS U-Pb apatite geochronological data. ..	69
Supplementary material B – LA-ICP-MS Trace elements in apatite.	79
Supplementary material C – LA-ICP-MS U-Pb geochronological data in titanite.	92

Lista de Figuras

Figura 1. Localização do depósito AQW2, localizado na região do Aquiri, na porção oeste da Província Mineral de Carajás. -----04

Figura 2. Mapa geológico do Domínio Carajás da Província Carajás, mostrando a área da Província Mineral de Carajás e áreas adjacentes (modificado de Fraga et al. 2020) com a localização dos depósitos minerais. -----06

Figura 3. Coluna estratigráfica esquemática simplificada para a área de estudo, modificada de Trunfull et al. (2020), com dados estruturais e metamórficos compilados de Tavares et al. (2018) e unidades geológicas segundo Costa et al. (2016). Idades das formações Gorotire, Águas Claras, Azul e Serra Azul seguem a proposta de Araújo Filho et al. (2020). -----11

Figure 1. Geological map of the Carajás Domain of the Carajás Province and adjacent areas (with the location of mineral deposits (modified from Fraga et al. 2020 by Dutra et al., 2021). -----20

Figura 2. Geological map of the AQW2 deposit area (Vale, 2017). ----- 28

Figure 3. Main geological units of the Aquiri area, nearby the AQW2 deposit. (A) Banded and foliated tonalite to granodiorite gneiss of the Xingu Complex with granite injections; (B) Green, isotropic, medium- to coarse-grained gabbro; (C) Weathered amygdaloidal basalt with quartz infill and rare malachite; (D) Folded banded iron formation with well defined bands composed of magnetite-(amphibole) and quartz; (E) Plane-parallel stratification in pelitic rocks, with alternating layers consisting of quartz and fillosilicates; (F) Sandstone with trough cross-bedding; (G) Foliated, gray, medium-grained granite with hornblende spots; (H) Gray, fine-grained, magnetic diabase; (I) Gold mineralized aluvial terrace (“garimpo” area). -----29

Figure 4. North-South cross-section of the AQW2 deposit, showing the main host rock, hydrothermal alteration zones and mineralized intercepts (VALE, 2017). ----- 32

Figure 5. Main hydrothermal alteration features in gabbro. (A) Structure-controlled hornblende formation in the gabbro; (B) Replacement of gabbro minerals by hydrothermal assemblage comprising amphibole, epidote, clinozoisite, chlorite and albite; (C) Albitite composed of pinkish albite and titanite with relicts of amphibole, mainly cummingtonite; (D) Pinkish albitite cut by late white albite veins and fractures infilled by K feldspar; (E) Net-veined breccia with fragments of pinkish albitite and infill of white albite, cut by late fractures infilled by K-feldspar and hematite; (F) White albite vein with coarse titanite crosscutting the pinkish albitite; (G) Late albite (II) veins cutting chloritized volcanic rock. -----33

Figure 6. Petrographic features of hydrothermally altered gabbro and albitites. (A) Gabbro replaced by hydrothermal hornblende, scapolite and clinozoisite (transmitted light; parallel polars (TL; PP); (B) Idem A with crossed polars (TL; CP); (C) Augite crystals in a gabbroic rock crosscut by micro-faults and albite veinlets (TL; CP); (D) Sheared domain in a gabbroic rock with infill of chlorite and coarse albite crystals (TL; CP); (E) Gabbro replaced by cummingtonite and albite with subordinate titanite (TL; PP); (F) Idem (TL; CP); (G) Rock composed of albite with subordinate chlorite and titanite; (H) Albitite represented by an almost monomineralic rock composed of coarse euhedral albite crystals, with associated coarse titanite, replaced by fine subhedral albite crystals (lower left; TL; CP); (I) Detail of the coarse titanite crystal in albitite. -----34

Figure 7. Main hydrothermal alteration features in the Aquiri Group volcanic rocks in the AQW2 deposit; (A) Basalt pervasively replaced by fine biotite with amygdalites infilled by quartz and biotite and fine scapolite crystals; (B) Basalt replaced by fine biotite and scapolite, with occurs as interconnected strings; (C) K-Cl-hastingsite alteration fronts (bluish color) in a biotite-altered basalt; (D) Alteration fronts with magnetite and subordinate chalcopyrite in basalt pervasively replaced by fine biotite and scapolite; (E) Fine almandine crystals developed in a biotite-rich rock, cut by grunerite alteration fronts; (F) Breccia with angular fragments of almandine- and grunerite-almandine-rich rocks in a hydrothermal matrix composed of tourmaline and subordinated almandine; (G) Foliated breccia with fragments of angular grunerite-almandine-rich rocks crosscut by fault and replaced by oriented grunerite and subordinated chalcopyrite. -----36

Figure 8. Breccias and mineralized zones in the AQW2 deposit. (A) Hydrothermal breccia with fragments of biotite-rich rocks in a scapolite matrix; (B) Net-veined breccia with oriented fragments of amygdaloidal basalt replaced by biotite, crosscut by interconnected scapolite strings; (C) Matrix-dominated breccia with oriented angular fragments of a biotite-hastingsite-rich rock in a grunerite matrix; (D) Deformed grunerite-cummingtonite-rich rock fragments in a foliated matrix made of K-Cl-hastingsite, Magnetite occurs along the foliation and in pressure shadows; (E) Breccia with small fragments of amphibole-rich rock involved by grunerite and cut by magnetite-chalcopyrite mineralization fronts; (F) Net-veined breccia with fragments of chlorite-altered rocks cut by albite-chalcopyrite veinlets; (G) Oriented magnetite-rich alteration front with subordinate chalcopyrite (I) in amphibole-rich (grunerite, K-Cl-hastingsite) rocks; (H) oriented breccia with fragments of K-Cl-hastingsite-rich rocks in a magnetite-rich matrix. Chalcopyrite (I) occurs along the foliation; (I) Oriented chalcopyrite (I) in a magnetite-rich rock; (J) Oriented magnetite-chalcopyrite (I) mineralization front in a K-Cl-hastingsite-rich rock; (K) Ore breccia with chalcopyrite in the matrix involving altered rock fragments; (L) Late breccia with quartz-calcite-chalcopyrite(II) infill in rocks pervasively replaced by chlorite. -----39

Figure 9. Mode of occurrence and texture of the apatite (I) generation. (A) Drill core sample PKC-AQW2-8-97.3, showing oriented breccia with flattened fragments of amphibole-rich rock in a magnetite-dominated matrix, cut by micro-faults and late veinlets; (B) TESCAN integrated mineral analyzer (TIMA) map, highlighting the early syntectonic magnetite and the late quartz-chalcopyrite-pyrite-magnetite-

stilpnomelane association in veinlets; (C) TIMA map of the same sample, showing the tiny oriented apatite (I) (yellow); (D) Photomicrography showing the association of apatite (I), magnetite (I) and K-Cl-hastingsite (TL-PP); (E) Green cathodoluminescence (CL) of apatite (I); (F) same of (D) under TL-CP; (G) Green to yellow-green CL of apatite (I). -----41

Figure 10. Mode of occurrence and texture of the apatite (II) generation. (A) Drill core sample PKC-AQW2-13-291.3, showing oriented and mineralized breccia with flattened fragments of actinolite-rich rock in a hastingsite-magnetite-dominated matrix; (B) TESCAN integrated mineral analyzer (TIMA) map, highlighting the syntectonic magnetite and chalcopyrite oriented along the mylonitic foliation; (C) TIMA map of the same sample, showing the oriented apatite (II) (yellow) in equilibrium with magnetite-chalcopyrite; (D and E) Photomicrography showing the association of oriented magnetite, K-Cl-hastingsite and quartz (TL-PP and TL-CP, respectively); (F and G) Oriented chalcopyrite associated with magnetite, bornite, and ilmenite. ----- 43

Figure 11. Mode of occurrence and texture of the apatite (III) generation. (A) TESCAN integrated mineral analyzer (TIMA) map (PKC-AQW2-7-143.1), highlighting the fine inclusions of apatite (III) in chalcopyrite associated with pyrite and albite in a mineralized front cutting a foliated amphibole-magnetite rock; (B) TIMA map of the same sample, showing the fine inclusions of apatite (III) in chalcopyrite; (C) Photomicrography showing subhedral apatite crystals associated with chalcopyrite (TL-CP); (D) Green CL of apatite (III), which has pleochroic halos due to tiny monazite inclusions; (E) Chalcopyrite, fine subhedral magnetite and apatite (III) under reflected light; (F) Yellow-green CL in apatite (III), which has spots with green CL related to monazite inclusions. ----- 44

Figure 12. Mode of occurrence and texture of the apatite (IV) generation. (A) Drill core sample PKC-AQW2-13-84.00 showing the late calcic alteration and mineralization; (B) TESCAN integrated mineral analyzer (TIMA) map (PKC-AQW2-13-84.00), highlighting the coarse apatite (IV) crystals related to late chalcopyrite, calcite, scapolite and actinolite, and minor chlorite that occur as infill; (C) Apatite (IV), calcite and actinolite association (TL-PP); (D and E) Coarse apatite (IV) with a cloudy aspect associated with chalcopyrite-(calcite); (F to G) Yellowish brown CL in apatite (IV), which has a bluish CL in cloudy altered portions. In (F), scapolite shows Bright purple CL and is altered along the rims by calcite with red CL; In (G) and (H), calcite has red CL. -----46

Figure 13. Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns of apatite from the AQW2 deposit and Tera-Wasserburg diagram of apatite U–Pb data for: (A) Apatite (I) (PKC-AQW2-8-97,3); (B) Apatite (II) (PKC-AQW2-13-291,3); (C) Apatite (III) (PKC-AQW2-7-143), and (D) apatite (IV) (PKC-AQW2-13-84,00). Ellipse uncertainties and errors are presented at 2 σ level of confidence. Tera-Wasserburg diagrams were calculated using IsoplotR (Vermeesch, 2018). -----48

Figure 14. Sr/Y vs. Σ LREE in ppm (defined as La-Nd) biplots of apatite from the AQW2 deposit with fields defined by a support vector machine (SVM) categorization scheme (O’Sullivan et al., 2020).

Abbreviations: ALK = alkali-rich igneous rocks; IM = mafic I-type granitoids and mafic igneous rocks; LM = low- and medium-grade metamorphic and metasomatic apatite; HM = partial-melts/leucosomes/high-grade metamorphic; S = S-type granitoids and high aluminum saturation index (ASI) 'felsic' I-types; UM = ultramafic rocks including carbonatites, lherzolites and pyroxenites. ----- 49

Figure 15. $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Tera-Wasserburg concordia diagrams for LA-ICP-MS U-Pb analyses of titanite from sample PKC-AQW2-2-157,00 associated with sodic alteration of the AQW2 copper deposit. Discord line anchored by the initial $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ratio calculated according to two stage Pb evolution curve of Stacey and Kramers (1975). -----51

1. INTRODUÇÃO

A Província Carajás se destaca mundialmente por apresentar importantes depósitos cupro-auríferos, alguns dos quais com quantidades de magnetita e assinatura química (Fe-Cu-Au-ETR-P-U-Co-Ni-Pd) comparáveis aos da classe de depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (*iron oxide-copper-gold deposits* ou IOCG; Hitzman *et al.*, 1992, Hitzman, 2000).

Entre os depósitos dessa classe em Carajás destacam-se Salobo (1.112 Gt @ 0.69 % Cu and 0.43 g/t Au; VALE 2012), Igarapé Bahia-Alemão (219 Mt @ 1,4% Cu e 0,86 g/t Au; Tallarico *et al.*, 2005), Sossego (355 Mt @ 1,5 % Cu e 0,28 g/t Au; Lancaster *et al.*, 2000), Alvo 118 (170 Mt @ 1,0% Cu e 0,3 g/t Au; Rigon *et al.*, 2000) e Cristalino (500 Mt @ 1,0% Cu e 0,3 Au; Huhn *et al.*, 1999a), além de vários outros alvos em avaliação.

Embora a Província Carajás apresente a maior concentração conhecida de depósitos IOCG de classe mundial, não há, até o momento, um modelo genético único que possa explicar todas as peculiaridades de cada um desses depósitos. A adoção de modelos já propostos para depósitos dessa classe em outras partes do mundo não parece ser compatível com os variáveis atributos dos depósitos IOCG de Carajás, que podem refletir a evolução única dessa província metalogenética durante o Arqueano e o Paleoproterozoico.

Estudos prévios, incluindo dados geocronológicos obtidos para mineralizações de óxido de ferro-Cu-Au de Carajás, indicam que o sistema mineral IOCG incluiu múltiplos eventos hidrotermais, que foram responsáveis pelas características híbridas (i.e., magmáticas *versus* externamente derivadas) reconhecidas nos depósitos. No entanto, é ainda necessária a compreensão de quais mecanismos geológicos, e quais eventos hidrotermais, condicionaram a formação das maiores reservas cupro-auríferas.

Aspectos notáveis relativos à evolução metalogenética da Província Carajás referem-se à:

(i) Diacronismo das idades de mineralização IOCG nos setores sul e norte da Província Carajás (*e.g.*, Cinturão Sul do Cobre, corpos Sequeirinho-Pista, ca. 2,70 Ga, U-Pb LA-ICP-MS em monazita e Re-Os em molibdenita; Moreto *et al.*, 2015a; Cinturão norte do

Cobre; depósito Igarapé Bahia, ca. 2,57 Ga, SHRIMP II monazita, Tallarico *et al.* 2005; Salobo, ca. 2,57 Ga; Re-Os em molibdenita; Réquia *et al.*, 2003), que apontam para recorrência de importantes eventos mineralizantes com características semelhantes (i.e., fluidos de alta temperatura e salinidade; relativamente oxidados; alto conteúdo de Fe, Cu, Au, ETR, P).

(ii) Evidências de recorrências de importantes eventos hidrotermais também durante o Paleoproterozoico (e.g., Alvo 118, ca. 1,88 Ga, Tallarico, 2003; Sossego-Curral, ca. 1.88 Ga, U-Pb LA-ICP-MS em monazita, Moreto *et al.*, 2015a), interligados à história tectônico-magmática de Carajás, que ainda precisa ser melhor compreendida;

(iii) Sobreposição de tipos e estilos de zonas de alteração hidrotermal e o zoneamento metálico (Ni-Co-Zn; Cu-Fe; Au) resultante dos múltiplos eventos geológicos.

Em especial, a natureza híbrida do(s) sistemas hidrotermais responsáveis pela formação dos depósitos IOCG, com componentes magmáticos e externos (Chiaradia *et al.*, 2006; Dreher *et al.* 2008; Monteiro *et al.*, 2008a, b; Xavier *et al.*, 2009; Torresi *et al.*, 2012), pode ser decorrência de uma evolução complexa. Fontes para componentes magmáticos (e.g., fluidos, metais e energia) para os sistemas hidrotermais, por exemplo, ainda não foram relacionadas a eventos ígneos específicos, o que torna difícil a definição de vetores para corpos mineralizados na província.

Nesse contexto, o estudo do depósito AQW2, atualmente um alvo de pesquisa de cobre da VALE S.A., localizado na região informalmente denominada Aquiri, na porção oeste da Província Mineral de Carajás, representa um maior desafio. O conhecimento dessa região é ainda restrito às áreas dos alvos de pesquisa mineral, com pouca ou nenhuma integração geológica entre eles. Assim, seu estudo se situa na fronteira do conhecimento e representa uma janela de oportunidade para a definição de novas áreas potenciais para cobre.

Adicionalmente, o depósito Cu–Au AQW2 apresenta particularidades que o tornam um estudo de caso de grande interesse metalogenético, incluindo as rochas hospedeiras predominantemente máficas (e.g., gabro e vulcânicas) e as extensas zonas de alteração hidrotermal com semelhanças tanto com aquelas típicas do Cinturão Sul do Cobre (e.g., biotita-escapolita, hastingsita-magnetita-apatita), como com os envelopes de alteração dos

depósitos do Cinturão Norte do Cobre (e.g., granada-grunerita, turmalina). Adicionalmente, o depósito apresenta extensas corpos de albitos, atribuídos ao metassomatismo sódico, conectado à sistemas de veios e *stockworks* que se sobrepõem à mineralização IOCG.

O depósito AQW2 apresenta diferentes gerações de apatita, que considerada um excelente traçador da fonte de fluidos e ligantes, uma vez que a sua composição química depende da composição do fluido hidrotermal, das rochas hospedeiras, das fases co-precipitadas e das condições físico-químicas da pluma de fluido hidrotermal. Assim, a caracterização das variações texturais e composicionais em apatita podem auxiliar na identificação da história de interação fluido-rocha (Belousova et al., 2001, 2002; Krneta et al., 2018) e na avaliação de parâmetros físico-químicos críticos para o transporte e precipitação de metais em sistemas hidrotermais (Mercer et al., 2020). A apatita também é um mineral passível de datação geocronológica pelo método U-Pb, o que possibilita a determinação do *timing* de mineralização-alteração hidrotermal.

Dessa forma, esse estudo visa reconstituir a evolução do depósito AQW2, incluindo a identificação de possíveis sobreposições de eventos arqueanos e proterozoicos, a partir do estudo textural, químico e geocronológico das diferentes gerações de apatita se utilizando de análises por LA-ICP-MS *in situ* de alta resolução. Assim, esse estudo, ao contribuir para a identificação da evolução metalogenética do depósito AQW2, poderá fornecer importantes subsídios para a identificação de processos críticos para a formação de depósitos IOCG de Carajás, contribuindo para o refinamento dos modelos metalogenéticos.

Os resultados obtidos neste estudo são apresentados em formato de artigo científico, precedido por um capítulo de contextualização geológica da Província Mineral de Carajás.

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo reconstituir a história evolutiva do depósito de cobre-ouro AQW2 e suas relações com eventos magmáticos e tectônicos registrados na Província Carajás, a partir da:

- (i) Caracterização das rochas hospedeiras, incluindo natureza do protólitos;
- (ii) Identificação dos estágios, tipos e estilos de alteração hidrotermal;
- (iii) Caracterização paragenética, textural e químico das diferentes gerações de apatita;
- (iv) Determinação de intervalos de idades de alteração hidrotermal e mineralização a partir de estudos geocronológicos pelo método LA-ICP-MS de fases minerais hidrotermais (e.g., apatita e titanita).

3. LOCALIZAÇÃO DO DEPÓSITO AQW2

A área do depósito AQW2 se localiza a leste da reserva indígena Apyterewa, aproximadamente a 150 km dos municípios de São Félix do Xingu e Tucumã, na região sudeste do estado do Pará (**Figura 1**).

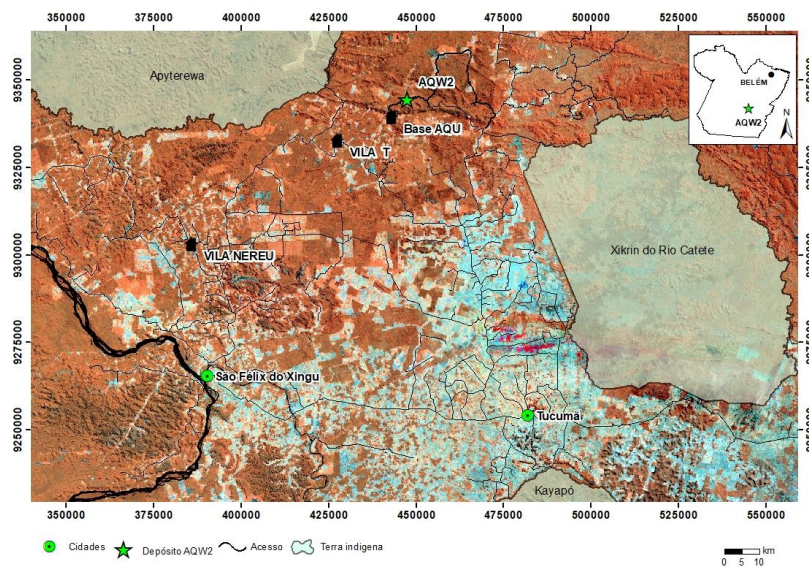


Figura 1. Localização do depósito AQW2, localizado na região do Aquiri, na porção oeste da Província Mineral de Carajás.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL: A PROVÍNCIA CARAJÁS

A região de Carajás representa o núcleo crustal mais antigo do Cráton Amazônico (Tassinari e Macambira, 1999; 2004). Considerada parte da Província Amazônia Central na proposta de compartimentação tectônica do Cráton Amazônico de Tassinari e Macambira (1999, 2004), a Província Carajás foi dividida por Vasquez *et al.* (2008) nos segmentos sul e norte, denominados de Domínio Rio Maria, previamente denominado de Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria, Docegeo, 1988), e Domínio Carajás, antigo Cinturão Itacaiúnas (Araújo *et al.*, 1988) (Figura 1).

No Domínio Rio Maria, o período inicial de acreção da crosta continental na região leste do Craton Amazônico foi decorrente de mecanismos de subducção, responsáveis pela geração de suítes plutônicas com composição tonalítica-trondjemítica-granodiorítica (TTG) e do vulcanismo cálcio-alcálico das sequências de *greenstone belts* tipo Rio Maria. Estes apresentam características evolutivas similares aos típicos *greenstone belts* presentes nos cratons do Kaapvaal, Província Superior, Zimbabwe, São Francisco e Yilgarn (Almeida *et al.*, 2010, 2011).

O vulcanismo komatiítico da Formação Igarapé Encantado (>2,9 Ga), que aflora predominantemente no *greenstone belt* Seringa, foi formado em ambiente extensional de *back arc*, por ação de pluma mantélica desvinculada dos processos acrecionais. Essa sequência *greenstone* foi cortada por intrusões mesoarqueanas de composição tonalítica-trondjemítica-granodiorítica (TTG), sanukitoide e graníticas (Oliveira *et al.*, 2009, 2010, Almeida *et al.*, 2010, 2011).

No Domínio Carajás (**Figura 2**), as sequências supracrustais da província, representadas por *greenstone belts* mesoarqueanos e pelas sequências vulcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas, neoarqueano, têm como embasamento o substrato síalico formado por granulitos com idades de cristalização de 3.002 ± 14 Ma (U–Pb SHRIMP

zircão, Pidgeon *et al.*, 2000) e gnaisses e migmatitos do Complexo Xingu (2.974 ± 15 Ma, Machado *et al.*, 1991). O processo de migmatização das rochas do Complexo Xingu (2.859 ± 2 Ma e 2.860 ± 2 Ma, U-Pb em zircão, Machado *et al.*, 1991) e granulitização do Complexo Pium (2.859 ± 9 Ma, U-Pb SHRIMP zircão; Pidgeon *et al.*, 2000) foram contemporâneos.

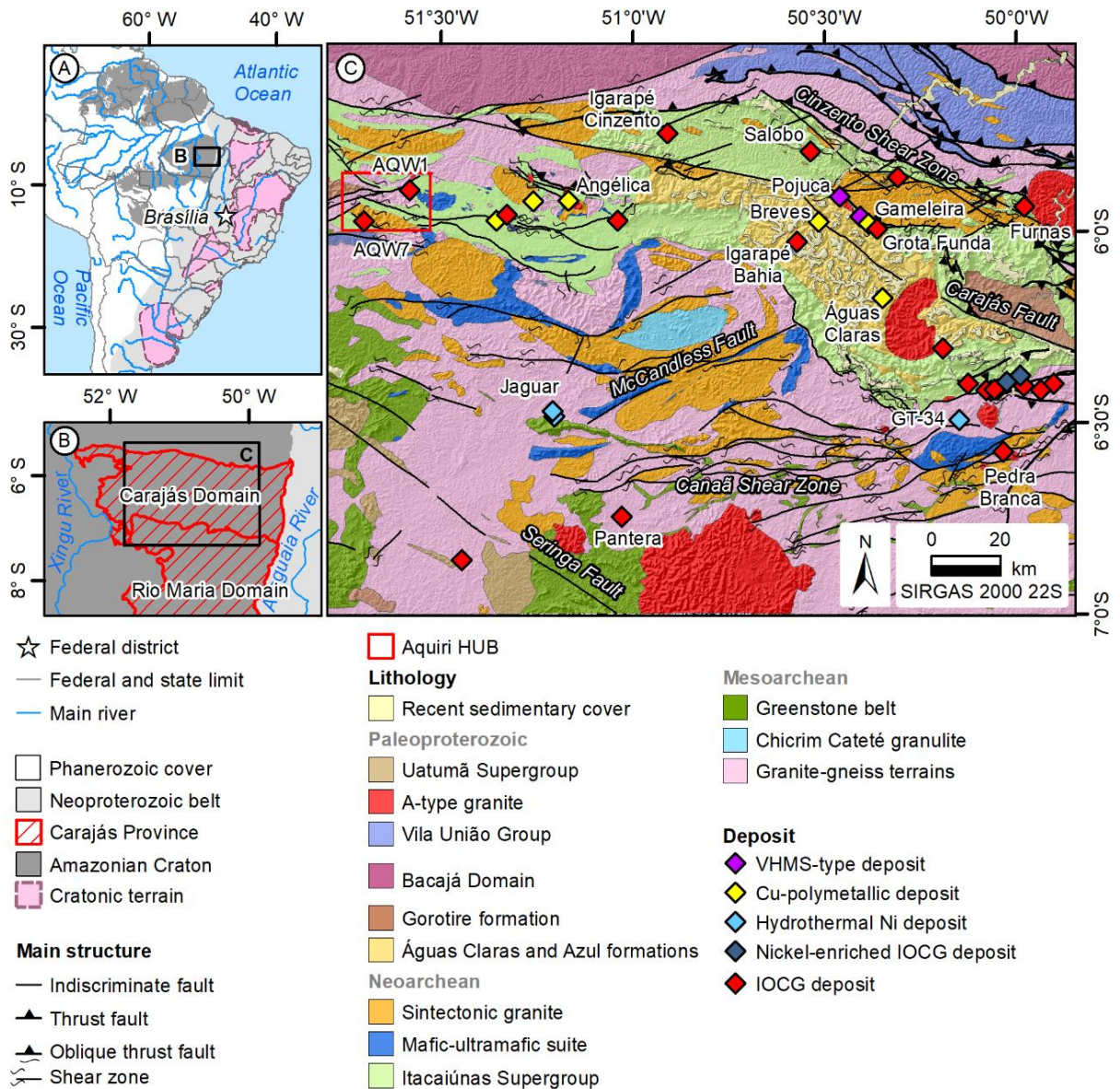


Figura 2. Mapa geológico do Domínio Carajás da Província Carajás, mostrando a área da Província Mineral de Carajás e áreas adjacentes (modificado de Fraga *et al.* 2020) com a localização dos depósitos minerais.

Granitoides com composição tonalítica-trondjemítica-granodiorítica (TTG), sanukitoide e rochas graníticas com idades entre ca. 3,00 Ga e ca. 2,87-2,83 Ga, anteriormente atribuídas ao Complexo Xingu, foram também individualizados no Domínio Carajás (Moreto *et al.*, 2011, 2013, 2015a, 2015b; Feio *et al.*, 2011).

As unidades metamórficas e ígneas mesoarqueanas compõem o núcleo mais antigo do Cráton Amazônico, circundado por sequências de *greenstone belts* mesoarqueanos. Siepierski & Ferreira-Filho (2016) descreveram komatiito com textura spinifex na borda sul da Bacia Carajás, que foi atribuído à sequência *Greenstone Belt* Selva. Essa sequência é composta por uma camada inferior de olivina cumulos e uma superior com komatiitos com textura spinifex.

O Supergrupo Itacaiúnas (Wirth *et al.*, 1986; DOCEGEO, 1988; Machado *et al.*, 1991) é formado por sequências de rochas vulcano-sedimentares (ca 2,75 Ga; Machado *et al.*, 1991; Trendall *et al.*, 1998) (**Figura 2**). Essa sequência foi subdividida em unidades aproximadamente cronocorrelatas, designadas de grupos: Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará e Igarapé Bahia (DOCEGEO, 1988). Da base para o topo, as rochas do Supergrupo Itacaiúnas são formadas por basaltos amigdaloidais espilitizados, intercalados por sedimentos carbonosos e por extensos pacotes de sedimentos químicos, principalmente jaspilitos, recobertos por uma sequência de basaltos, intercalados com andesitos, rochas piroclásticas, vulcânicas riolíticas e tufos, com sedimentos epiclásticos e turbidíticos no topo, formadas entre 2,76 a 2,70 Ga. Na região do Aquiri, na porção oeste do Domínio Carajás, as unidades vulcanossedimentares foram agrupadas no Grupo Aquiri por Soares *et al.* (1988), considerado cronocorrelato às demais unidades do Supergrupo Itacaiúnas (Vasquez *et al.*, 2008). A oeste, são ainda individualizados os grupos São Félix, no qual são conhecidas formações ferríferas e ocorrências de ouro, e São Sebastião, com ocorrências de garimpos de ouro e depósitos de ferro de alto teor associados às formações ferríferas (Macambira and Vale, 1997).

As estruturas da Bacia de Carajás são indicativas de um caráter sinistral para as

movimentações tectônicas formadoras da bacia deposicional das rochas supracrustais do Supergrupo Itacaiúnas. Tais movimentação foram interpretadas pelo GLAM (*Global Lithospheric Architecture*) como resultantes de uma subducção recorrente, que teria gerado extensão e rifteamento intra-cratônico entre o Domínio Carajás e o Domínio Rio Maria.

Complexos máfico-ultramáficos distribuem-se ao longo de dois *trends* regionais com direção E-W e N-S (Macambira e Ferreira Filho, 2002). Estes complexos máfico-ultramáficos são conhecidos por conter depósitos significativos de níquel laterítico, tais como Onça, Puma, Jacaré e Mundial, associados a zonas constituídas predominantemente por rochas duníticas. As inúmeras intrusões acamadadas podem, potencialmente, hospedar também depósitos magmáticos de Ni-Cu-PGE. A abundância de rochas ultramáficas, bem como a composição primitiva de rochas cumuláticas com olivina (conteúdo da molécula Fo na olivina de até 92 mol%; Ferreira Filho et al, 2007), indica uma grande quantidade de magmas derivados de um manto primitivo. Dados geocronológicos obtidos em rochas dos complexos Puma (2.713 ± 30 Ma, U-Pb em zircão; Rosa, 2014), Lago Grande (2.722 ± 53 Ma, U-Pb zircão; Teixeira, 2013), Serra da Onça (2.766 ± 6 Ma; dados não publicados, relatado por Lafon *et al.*, 2000) e Luanga (2.763 ± 6 Ma; Machado *et al.*, 1991) sugerem que as diversas intrusões são parte de um grande evento magmático do Neoarqueano (ca. 2,76 Ga), coevo à abertura da bacia Itacaiúnas e a magmatismo granítico

O magmatismo granítico do Neoarqueano no Domínio Carajás é representado pelos granitos alcalinos a cálcio-alcalinos foliados (ca. 2,76 a 2,73 Ga), representados pelas suítes Plaqué, Planalto, Estrela, Igarapé Gelado e Serra do Rabo (Huhn *et al.*, 1999a, 1999b; Avelar *et al.*, 1999; Barros *et al.*, 2004; Sardinha *et al.*, 2006; Feio *et al.*, 2011).

Mais restritamente, magmatismo granítico de caráter peralcalino a meta-aluminoso (ca. 2,57 Ga) tem sido atribuído a dois pequenos corpos graníticos, denominados de Old Salobo e Itacaiúnas, que afloram nos arredores dos depósitos Salobo e Pojuca, respectivamente (Machado *et al.*, 1991; Souza *et al.*, 1996). Trabalhos mais recentes no

depósito do Salobo (Melo, 2017), no entanto, indicam que os grãos de zircão datados em ca. 2,57 Ga podem representar os eventos de alta temperatura relacionados com a mineralização do tipo IOCG que ocorre em Carajás. Grãos de zircão com essa idade foram encontrados também nas rochas gabroicas associadas ao corpo ultramáfico do Lago Grande (Teixeira, 2013). Nesse caso, as idades de ca. 2,57 Ga não representariam a idade de cristalização do protólito e sim do evento de hidrotermalismo que causou reequilíbrio dos zircões para esta idade.

A Formação Águas Claras se sobrepõe, em discordância angular, às sequências metavulcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas. É representada por uma cobertura siliciclástica depositada em ambiente fluvial a marinho raso, composta por (meta)-conglomerados, (meta)-arenitos, mármore dolomítico, filito carbonoso e sericita quartzitos (Nogueira *et al.*, 1995). Sua idade mínima de deposição é dada pela idade de zircão de diques máficos intrusivos nessa formação (2.645 ± 12 Ma e 2.708 ± 37 Ma, U-Pb em zircão, Dias *et al.*, 1996; Mougeot *et al.*, 1996). Idades obtidas em 200 zircões retirados dos sedimentos da Formação Águas Claras revelaram idades variando entre 2.778 a 3.020 Ma, indicando idade máxima neoarqueana para a fonte dos sedimentos (Mougeot *et al.*, 1996). Contudo, sulfetos interpretados como diagenéticos presentes em meta-arenitos mostraram idade de ca. 2.06 Ga (Pb-Pb), obtidas por Mougeot *et al.* (1996b). Essa idade foi considerada por Fabre *et al.* (2011) evidência de idade paleoproterozoica para a Formação Águas Claras, uma vez que isótopos múltiplos de enxofre em sulfetos dessa unidade não mostraram evidência de fracionamento isotópico independente de massa (*Mass Independent Fractionation*; MIF), que seria típico de sulfetos formados em ambiente sedimentar durante o Arqueano.

Magmatismo granítico anorogênico alcalino a subalcalino (ca. 1,88 Ga), representado pelos granitos Central de Carajás, Young Salobo, Cigano, Pojuca e Breves (Machado *et al.*, 1991, Lindenmayer & Teixeira 1999; Tallarico 2003), é amplamente reconhecido em toda a província.

A Formação Gorotire (Barbosa *et al.*, 1966) é uma unidade siliciclástica imatura da Província Mineral de Carajás, que inclui conglomerados e arenitos expostos na porção leste da Serra dos Carajás. Considerada de idade paleoproterozoica, foi reinterpretada por Lima (2002) como depósitos de fluxos de detritos e fluviais entrelaçados, formados em um graben relacionado à história de reativação tectônica da Falha Carajás. A prevalência de arenitos grossos e conglomerados, estratificação cruzada acanalada e plano-paralela de médio porte, clastos imbricados e presença de superfícies erosivas atesta ambiente sedimentar fluvial entrelaçado (Oliveira *et al.*, 2013). A constante migração dos canais causa erosão (reativação) das formas de leito como dunas arenosas devido à escassez de vegetação no Pré-cambriano (Miall, 2006). Datação de zircão detrítico indicou quatro fontes principais para os sedimentos da Formação Gorotire com idades de ca. 2.877 Ma; ca. 2.123 e 2.055 Ma (Bacajá) e na sua maioria ca. 2.735 Ma, tendo como fonte as rochas do Grupo Grão Pará (Fabre *et al.*, 2011).

A Província Mineral de Carajás é alvo de intenso debate científico, o que se reflete nas inúmeras colunas estratigráficas que foram, e são ainda, propostas à medida que novos dados são obtidos e atualizados. A sistematização do conhecimento regional acumulado nas décadas de 60 e 70 levou Hirata *et al.* (1982) a proporem uma coluna estratigráfica informal para a região.

De modo a facilitar o entendimento da evolução geológica e uniformizar a nomenclatura para as unidades definidas, foi proposta uma coluna litoestratigráfica pela equipe do Distrito Amazônia da DOCEGEO, elaborada a partir dos dados acumulados pela empresa desde 1974, atualizada com os resultados de trabalhos desenvolvidos por outras empresas e instituições de pesquisas (e.g., Trunfull *et al.*, 2020), conforme a Figura 3.

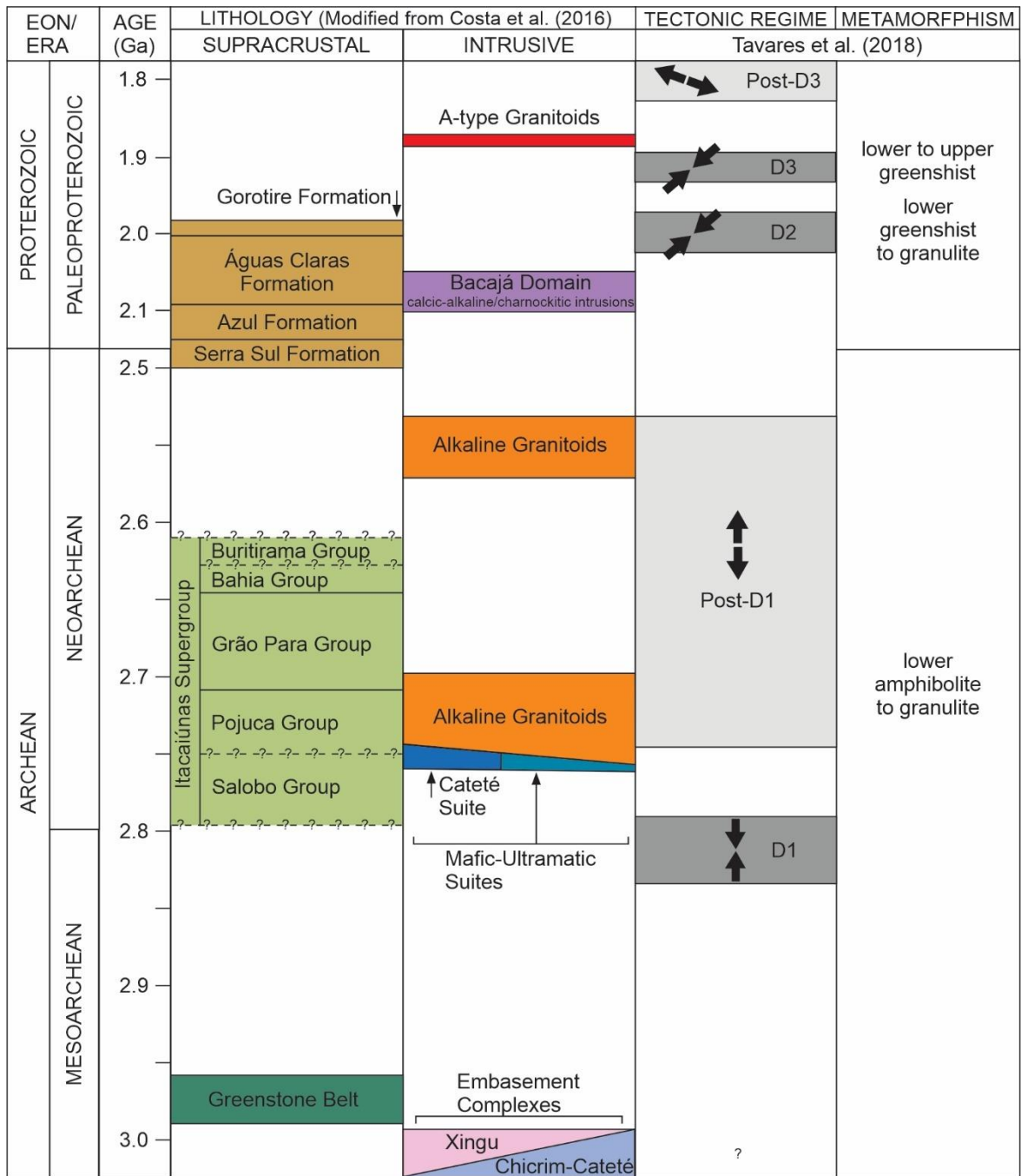


Figura 3. Coluna estratigráfica esquemática simplificada para a área de estudo, modificada de Trunfull et al. (2020), com dados estruturais e metamórficos compilados de Tavares et al. (2018) e unidades geológicas segundo Costa et al. (2016). Idades das formações Gorotire, Águas Claras, Azul e Serra Azul seguem a proposta de Araújo Filho et al. (2020).

Trabalhos como os de Lindenmayer (1990), Araújo & Maia (1991), Costa et al. (1993), Barros et al. (1995), Barros (1997) e Pinheiro & Holdsworth (1997) deram atenção ao entendimento do quadro geológico regional da Serra dos Carajás.

Estudos mais recentes têm dado ênfase à evolução tectono-estratigráfica, petrogênese, metalogênese e, principalmente, a geocronologia das rochas da Província Mineral de Carajás (e.g., Pinheiro & Holdsworth (2000); Leite (2001); Althoff *et al.* (2000); Pidgeon *et al.* (2000); Barros *et al.* (2001); Macambira *et al.* (2001); Barbosa (2004) e Villas & Galarza (2001), entre outros).

CONCLUSÕES

A integração de dados geológicos, petrográficos, de elementos traço e geocronológicos indica que:

i. A mineralização cobre-ouro no depósito AQW2 foi controlada por uma zona de cisalhamento rúptil-dúctil anastomosada, com direção preferencial E-W, alojada ao longo de um *trend* principal NW-SE, e espacialmente relacionada a domínios de alta deformação a brechas ricas em magnetita;

ii. Múltiplos estágios de brechação foram associados à sobrepressão de fluidos canalizados na zona de falha;

iii. Zonas de alteração hidrotermal com biotita-escapolita (Na-K), Cl-K-hastingsita-magnetita-apatita (K-Ca-Fe) e metassomatismo de ferro (magnetita-grunerita-almandina) podem estar relacionados a fluidos ricos em ferro e cloro provavelmente exsolvidos de magmas máficos;

4. A alteração inicial (K)-Ca-Fe com hastingsita-magnetita-apatita foi formada em 2701 ± 50 Ma, como indicado pela datação U-Pb LA-ICP-MS da apatita (I).

v. O principal estágio de mineralização do cobre (calcopirita-magnetita, com bornita e pirita subordinadas), ligado ao forte metassomatismo Fe-(P), tem uma assinatura química típica de depósitos IOCG (Cu-Au-Fe-La-P-U) e foi desenvolvido entre 2591 ± 65 Ma (MSWD = 1,6) e 2527 ± 27 Ma (MSWD = 1,1), como evidencia as idades U-Pb obtidas na apatita (II) e (III).

vi. Extensos corpos de albitos foram formados a partir da alteração sódica intensa de rochas gabróicas, em porções distais em relação aos principais corpos mineralizados de Cu-Au, em 2502 ± 14 Ma (MSWD = 16), como indica a idade U-Pb LA-ICP-MS em titanita coeva à albitização.

vii. Eventos hidrotermais tardios foram associados a estruturas rúpteis (por exemplo, alteração cálcica e mineralização tardia de cobre) e formados no Paleoproterozoico, conforme indica a idade U-Pb da apatita tardia (IV) (2295 ± 65 Ma).

No geral, o conjunto de dados obtido para o depósito AQW2 revela uma evolução de longo prazo intimamente ligada aos eventos hidrotermais registrados no Cinturão Norte de Cobre como parte do sistema IOCG de grande escala na Província Mineral de Carajás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida J.A.C., Dall'Agnol R., Dias S.B., Althoff F.J. 2010. 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.
- 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. 2011. 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. *Precamb. Res.* 120: 235-257.
- Althoff, F. J., P. Barbey., Boullier A.M., 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*104(3-4): 187-206.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N. 1991. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília: DNPM/Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais-CPRM, 152 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.
- Araújo, R., Nogueira, A., 2019. Serra Sul diamictite of the Carajás Basin (Brazil): A Paleoproterozoic glaciation on the Amazonian craton. *Geology*, 47, no. 12, p. 1166-1170.
- Araújo, R.N., Sousa, M.J., 2018, *Geologia, Estratigrafia e análise do minério dos depósitos de manganês de Carajás: regiões do Azul, Sereno Buritirama e Antônio Vicente: CPRM-Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais*, 198 p.
- Avelar VG, Lafon JM, Correia FC Jr, Macambira BEM. 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás, Amazônia Oriental, Brasil: novos dados geocronológicos. *Rev Bras Geoc.* 29:453–460
- Barbosa J.P.O. 2004. *Geologia Estrutural, Geoquímica, Petrografia e Geocronologia de granitóides da região do Igarapé Gelado, norte da Província Mineral de Carajás. Dissertação de Mestrado, UFPA, 96p.*
- Barbosa O, Ramos J.R.A., Gomes F.A., Helmont R. 1966. *Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do "Projeto Araguaia". Monografia da DGM, Rio de Janeiro, 94 p.*
- Barros, C. E. M., 1997. *Pétrologie et structure du Complexe Granitique Estrela (2.5 Ga) et de son encaissant métavolcano-sédimentaire (Province Métallifère de Carajás, Brésil). Nancy I/CRPG. Nancy, Université Henri Poincaré. PhD Thesis: 316*
- 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(3-4): 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. Rev. Brasil. Geoci.* 34, 531–

538.

- Barros, C. E. M.; Macambira, M. J. B.; Barbey, P. 2001. Idade de zircão do complexo granítico Estrela: relações entre magmatismo, deformação e metamorfismo na província metalogenética de Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 7., Belém, 2001. Resumos Expandidos. Belém, SBG-Núcleo Norte. (CD-ROM)
- Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., E Fisher, N.I. 2002, Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: Trace-element compositions and their relationship to host rock type: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 76, p. 45–69, doi:10.1016/S0375-6742(02)00204-2.
- Belousova, E.A., Walters, S., Griffin, W.L., E O'reilly, S.Y., 2001, Trace-element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, Northwestern Queensland: *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 48, p. 603–619, doi:10.1046/j.1440-0952.2001.00879.x.
- Chiaradia, M., Banks, D., Cliff, R., Marschik, R., de Haller, A., 2006. Origin of fluids in iron oxide-copper-gold deposits: constraints from $\delta^{37}\text{Cl}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Cl/Br. *Miner. Dep.*, 41: 565-573.
- Cordani, U.G., Ramos, V.A., Fraga, L.M., Cegarra, M., Delgado, I., Souza, K.G. de, Gomes, F.E.M., Schobbenhaus, C., 2016, Tectonic map of South America. Mapa tectônico da América do Sul: Paris, CGMW-CPRM-SEGEMAR, scale 1:5.000.000.
- Costa, I., Tavares, F., Oliveira, J., 2019, Predictive lithological mapping through machine learning methods: a case study in the Cinzento Lineament, Carajás Province, Brazil: *Journal of the Geological Survey of Brazil*, v. 2, p. 26–36, doi:10.29396/jgsb.2019.v2.n1.3.
- Costa, I.S.L., Serafim, I.C.C. de O., Tavares, F.M., Polo, H.J. de O., 2020, Uranium anomalies detection through Random Forest regression: *Exploration Geophysics*, v. 51, p. 555–569, doi:10.1080/08123985.2020.1725387.

- Costa, J. B. S., Macambira, E. M. B., Vale, A. G., Araújo, O. J. B., Pinheiro, R. V. L., JOÃO, X. S. J., 1993. Evolução litoestrutural da região de São Félix do Xingu. Serra dos Carajás. *Geociências*, São Paulo, 12(2)315-332.
- Costa, J. B. S.; Hasui, Y. Evolução geológica da Amazônia. In: Costa, M. L.; Angélica, R. S. (Ed.) *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém: SBG, 1997. p. 15-19.
- Costa, U.A.P., Paula, R.R. de, Silva, D.P.B., Barbosa, J. dos P. de O., Silva, C.M.G. da, Tavares, F.M., Oliveira, J.K.M. de, Justo, A.P., 2016, Programa Geologia do Brasil-PGB. Mapa de integração geológico-geofísica da ARIM Carajás: Belém, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/19048>.
- Delinardo da Silva, M.A., Monteiro, L.V.S., Santos, T.J.S., Moreto, C.P.N., Sousa, S.D., Faustinoni, J.M., Melo, G.H.C., Xavier, R.P., and Toledo, B.A.M., 2021, Mesoarchean migmatites of the Carajás Province: From intra-arc melting to collision: *Lithos*, v. 388–389, p. 106078, doi:10.1016/j.lithos.2021.106078.
- Dias, G.S., Macambira, M.B., Dall'Ágnol, R., Soares, A.D.V. Barros, C.E.M., 1996. Datações de zircões de sill de metagabro: comprovação de idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás, Pará. In: *Simp. Geol. Amaz.*, 5, SBG, Belém, pp. 376-378.
- Docegeo 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: *Cong. Bras. Geol.*, 35, SBG, p. 11–54.
- Dreher A.M., Xavier R.P., Taylor B.E., Martini S. 2008. New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu–Au deposit, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*, 43:161-184
- Fabre, S., Nédélec, A., Poitrasson, F., Strauss, H., Thomazo, C., Nogueira, A. 2011. Iron and Sulphur isotopes from the Carajás mining province (Pará, Brazil): implications for the oxidation of the ocean and the atmosphere across the Archaean-Proterozoic transition. *Chem. Geol.* 289: 124-139.
- Feio G.R.L. 2011. Magmatismo granitóide arqueano da área de Canaã dos Carajás:

implicações para a evolução crustal da Província. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará.

Ferreira Filho, C.F., Cançado, F., Correa, C., Macambira, E.M.B., Siepierski, L., Junqueira-Brod, T. C. 2007. Mineralizações estratiformes de EGP-Ni associadas a complexos acamadados em Carajás: os exemplos de Luanga e Serra da Onça, in Contribuições à Geologia da Amazônia, Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte, 01-14.

Fraga, L.M., Silva, D.P.B., Corrêa, L.W.C.; da Silva, L.C., Costa, U.A.P., Barbosa, J. dos P. de O., Silva, C.M.G., de Paula, R.R., 2020, Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Setor Aquiri – ARIM Carajás. Estado do Pará. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Belém, 1 mapa colorido, escala 1:50.000.

GLAM - Global Lithospheric Architecture Mapping – <http://newgenco.net/subscription-to-glam>

Harlov, D.E. 2015. Apatite: a fingerprint for metasomatic processes. *Elements*, 11: 171-176, DOI: 10.2113/gselements.11.3.171.

Hirata W.K., Rigon J.C., Kadekaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.A. 1982. Geologia Regional da Província Mineral de Carajás. In: Simp. Geol. Amaz., 1, Belém, SBG/NO, p. 100–110.

Hitzman, M.W., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when and why?, in Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal Iron-Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*, PGC Publishing, Adelaide, pp. 9-25.

Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T., 1992, Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precamb. Res.* 58:241–287.

Huhn S.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, Simp. Geol. Amaz., 6, Boletim de Resumos, p. 463-466.

Huhn SRB, Souza CIJ, Albuquerque MC, Leal ED, Brustolin V. 1999a. Descoberta do depósito Cu(Au) Cristalino: Geologia e mineralização associada região da Serra do Rabo -

Carajás – PA. SBG/NO, Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, pp 140–143

- Krneta, S., Ciobanu, C.L., Cook, N.L., Ehrig, K.J. 2018. Numerical Modeling of REE Fractionation Patterns in Fluorapatite from the Olympic Dam Deposit (South Australia). *Minerals* 2018, 8, 342; doi:10.3390/min8080342.
- Lafon J.M., Macambira M.J.B., Pidgeon R.T. 2000. Zircon U-Pb SHRIMP dating of Neoproterozoic magmatism in the southwestern part of the Carajás Province (eastern Amazonian Craton, Brazil). In: *Inter. Geol. Congr., 31., Abstracts*, Rio de Janeiro, [CD-ROM].
- Lancaster Oliveira J, Fanton J, Almeida AJ, Leveille RA, Vieira S. 2000. Discovery and geology of the Sossego copper–gold deposit, Carajás District, Pará State, Brazil. In: *IUGS, Intern Geol Congr, 31, [CD-ROM]*
- Leite, A. A. S. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitóides arqueanos da região de Xinguara. SE do Cráton Amazônico. 2001. 330 p. Tese (Doutorado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Leite, E.P., Souza Filho, C.R. de, 2010, Mapas auto-organizáveis aplicados ao mapeamento do potencial mineral na região de Serra Leste, Província Mineral de Carajás, Pará: *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, p. 397–409, doi:10.1590/s0102-261x2010000300006.
- Lima, F. D., 2002. Evolução tectônica da terminação leste da Falha Carajás, sul do Estado do Pará. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Belém, Universidade Federal do Pará. MSc. thesis: 96.
- Lindenmayer Z.G. 1990. Salobo sequence, Carajás, Brasil: Geology, Geochemistry and Metamorphism. PhD Thesis, University of Ontario, Canada, 407p.
- Lindenmayer, Z. G., Teixeira, J. B. G., 1999. Ore genesis at the Salobo Copper deposit, Serra dos Carajás. In: Silva, M.G. and Misi, A. (eds), *Base Metal Deposits of Brazil*.

MME/CPRM/DNPM, 33–43.

- Macambira E.M.B. and Ferreira Filho C.F., 2002. Fracionamento Magmático dos Corpos Máfico-Ultramáficos da Suíte Intrusiva Cateté – Sul do Pará. In: Klein E.L., Vasquez M.L. & Rosa Costa L.T. (eds.) Contribuições à Geologia da Amazônia v. 3. SBG-Núcleo Norte, pp. 105-114
- Macambira, E.M.B., Vale, A.G., 1997. São Félix do Xingu: folha SB.22-YB, Estado do Pará, escala 1: 250.000. Texto Explicativo. CPRM, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB), Brasília.
- Machado N., Lindenmayer D.H., Krough T.E., Lindenmayer Z.G. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precamb. Res.* 49:329-354
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., Lindenmayer, D., 1991, U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil: *Precambrian Research*, v. 49, p. 329–354, doi:10.1016/0301-9268(91)90040-H.
- Melo, G.H.C. de, Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., Santiago, E.S., Dufrane, S.A., Aires, B., Santos, A.F.F. 2018. Temporal evolution of the giant Salobo IOCG deposit, Carajás Province (Brazil): constraints from paragenesis of hydrothermal alteration and U–Pb geochronology. *Mineralium Deposita*, 52: pp. 709–732. DOI: 10.1007/s00126-016-0693-5.
- Mercer, C., Watts, K.E., Gross, J. 2020. Apatite trace element geochemistry and cathodoluminescent textures—A comparison between regional magmatism and the Pea Ridge IOAREE and Boss IOCG deposits, southeastern Missouri iron metallogenic province, USA. *Ore Geology Reviews* 116 (2020) 103129.
- Miall A.D. (ed.). 2006. *The Geology of Fluvial Deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology*. New York, Springer, 582 p.

- 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. *Miner. Depos.*, 43:129–159.
- Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Hitzman M.W., Juliani C., Souza Filho, C.R., Carvalho E.R. 2008b. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 34:317–336.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., Souza Filho, C.R. and Torresi, I., 2008a - Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: parageneses and stable isotope constraints; *Mineralium Deposita*, v. 43, pp. 129-159.
- Moreto C.P.N. 2013. U-Pb and Re-Os geochronology applied to the metallogenetic evolution of the Southern Copper Belt of the Carajás province PhD Thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 216 p.
- Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Amaral W.S., Santos T.J.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. *Miner. Dep.*, 46: 789-811.
- Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Creaser, R. A., DuFrane, S. A., Tassinari, C. C. G., & Amaral, W. S. 2015b. Neoproterozoic and Paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossego Deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb geochronological evidence. *Economic Geology*, 110(3), 809-835.
- Moreto, C. P., Monteiro, L. V., Xavier, R. P., Creaser, R. A., DuFrane, S. A., Melo, G. H., &

- Sato, K. 2015a. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*, 50(5), 517-546.
- Mougeot R., Respaut J.P., Briqueu L., Ledru P., Milesi J.P., Macambira M.J.B., Huhn S.B. 1996. Geochronological constrains for the age of the Águas Claras Formation (Carajás Province, Pará, Brazil). In: Cong. Bras. Geol, 39, Anais., Salvador, SBG. 6:579-581.
- Mougeot, R., Respaut, J. P., *et al.*, 1996. Isotope geochemistry constrains for Cu, Au mineralizations and evolutions of the Carajás Province (Pará, Brazil). XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador-Brazil, SBG, 39, Anais, 579-581.
- 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, Ciênc. da Terra*, (7), pg. 177-277.
- Oliveira A. & Nascimento M. 2013. Ambiente Depositional Fluvial Entrelaçado da Formação Gorotire no Leste da Serra dos Carajás, sudeste do Craton Amazônico. *Anais do 13º Simpósio de Geologia da Amazônia 22 a 26 de setembro de 2013*.
- Oliveira M.A., Dall’Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S. 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 27: 146-160
- Oliveira M.A., Dall’Agnol R., Scaillet B., 2010. Petrological constraints on crystallization conditions of Mesoarchean Sanukitoid Rocks, southeastern Amazonian craton, Brazil. *J Petrol.* 51:2121-2148.
- O’Sullivan, G., Chew, D., Kenny, G., Henrichs, I., Mulligan, D. 2020. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies. *Earth-Science Reviews* 201 (2020) 103044
- Palma, G., Barra, F., Reich, M., Valencia, V., Simon, A.C., Vervoort, J., Leisen, M., and Romero, R., 2019, Halogens, trace element concentrations, and Sr-Nd isotopes in apatite

- from iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: Evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 246, p. 515–540, doi:10.1016/j.gca.2018.12.019.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., and Hergt, J., 2011, Lolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data: *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, v. 26, p. 2508–2518, doi:10.1039/c1ja10172b.
- 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.
- 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: *Chemical Geology*, v. 166, p. 159–171, doi:10.1016/S0009-2541(99)00190-4.
- Pinheiro, R. V. L., Holdsworth, R. E., 2000. The Anatomy of shallow – crustal transpressional structures: insights from the Archaean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. *Journal of Structural Geology*, 22:1105-1123.
- Pinheiro, R. V. L., Holdsworth, R.E., 1997. Reactivation of Archean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society* 154: 99-103.
- 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. *Miner. Dep.*, 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. In: IUGS, International Geological Congress, 31 [CD-ROM]

- Rosa, W.D., 2014. Complexos Acamadados da Serra do Onça e Serra do Puma: Geologia e Petrologia de Duas Intrusões Máfico-Ultramáficas com Sequência de Cristalização Distinta na Província Arqueana de Carajás, Brasil. Dissertação (Mestrado em Geologia)-Universidade de Brasília, Brasília.
- Santos, J.O.S., 2003, Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. Geotectonics of the Guyana and Central Brazilian Shields, *in* Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. orgs., Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, Brasília, CPRM, p. 169–226.
- Sardinha A.S., Barros C.E. de M., Krymsky M. 2006. Geology, geochemistry and U–Pb geochronology of the Archean (2.74Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metalogenetic Province, northern Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 20, 327–339.
- Silva, M.A.D. da, 2014, Metatexitos e diatexitos do Complexo Xingu na região de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução mesoarqueana do Domínio Carajás [Dissertação de mestrado]: Universidade Estadual de Campinas, 110 p., <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/286608>.
- Soares, A.D.V., Bernardelli, A.L., Medeiros Filho, C.A., de Bastos, J.M.E., Martins, L.P.B., Lourenço, R.S., 1988. Geologia regional das cabeceiras do Igarapé Aquiri, extremo oeste da Província Mineral de Carajás (PA), *in*: Congresso Brasileiro de Geologia, 35°, Belém, PA, Anais, v. 6, p. 2704–2712.
- 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*: Simp. Geol. Amaz., 5, Belém, Anais, 380–383.
- Tallarico F.H.B. 2003. O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil. Tese de Doutorado, UNICAMP, 229p
- 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. *Econ Geol* 100:7–28.
- Teixeira, A.S., 2013. *Geologia, Petrologia e Geocronologia do Complexo Acamadado Lago Grande: Evidência para uma Suite Magmática Mineralizada a PGE na Província Carajás – Brasil*. Unpubl. M.Sc. thesis, Universidade de Brasília, Brazil, 108 pp.
- Toledo, P., Moreto, C.P.N., Xavier, R.P., Gao, J-F., Matos, J.H., Melo, G.H.C., 2019. Multistage Evolution of the Neoproterozoic (ca. 2.7 Ga) Igarapé Cinzento (GT-46) Iron Oxide Copper–Gold Deposit, Cinzento Shear Zone, Carajás Province, Brazil. *Econ. Geol.* 114, 1–34. 10.5382/econgeo.2019.4617.
- 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. *Miner Deposita*, 47: 299-323.
- Trunfull, E.F., Hagemann, S.G., Xavier, R.P., Moreto, C.P., 2020, Critical assessment of geochronological data from the Carajás Mineral Province, Brazil: implications for metallogeny and tectonic Evolution. *Ore Geology Reviews*, 121, 103556, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103556.
- Vale 2017. Projeto Aquiri - Alvo AQW2. Relatório Interno (Inédito).
- Vale. 2012. Vale obtains operation license for Salobo. <http://saladeimprensa.vale.com/en/release/interna.asp?id=22000>. Accessed in february 04, 2013.
- Vale.2016. _Aquiri W2_pet_Petrografia AQW2 Carajás.
- Vasquez LV, Rosa-Costa LR, Silva CG, Ricci PF, Barbosa JO, Klein EL, Lopes ES, Macambira EB, Chaves CL, Carvalho JM, Oliveira JG, Anjos GC, Silva HR (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* Organizadores, Vasquez ML, Rosa-Costa LT. 1:1.000.000. CPRM, Belém.

- Vasquez, M.L. *et al.*, 2008a, Unidades litoestratigráficas, *in* Vasquez, M.L. e Rosa-Costa, L.T. da orgs., 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 1:1.000.000, Belém, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém, p. 113–216, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/10443>.
- Vasquez, M.L., Chaves, C.L., Melo, E.M., Oliveira, J.K.M. de, 2014, Geologia e recursos minerais das folhas São Domingos, SB.21-Z-A-II e Jardim do Ouro, SB.21-Z-A-III: estado do Pará. Escala 1:100.000: Belém, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17997>.
- Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L.T. da, Silva, C.M.G. da, Klein, E.L., 2008b, Compartimentação tectônica, *in* Vasquez, M.L. e Rosa-Costa, L.T. da orgs., 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 1:1.000.000, Belém, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém, p. 39–112, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/10443>.
- Vermeesch, P., 2018, IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology: *Geoscience Frontiers*, v. 9, p. 1479–1493, doi:10.1016/j.gsf.2018.04.001.
- Villas, R. N., Santos, M. D., 2001. Gold deposits of the Carajás Mineral Province: deposit types and metallogenesis. *Miner. Depos.* 36, 300–331.
- 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. *Rev. Bras. Geoci.* 16: 195–200.
- Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S, Moreto, C.P.N., Pestilho, A.L.S., Melo, G.H.C. de, Delinardo da Silva, M.A., Aires, B., Ribeiro, C., Freitas e Silva, F.H., 2012, The Iron Oxide Copper-Gold Systems of the Carajás Mineral Province, Brazil, *in* Hedenquist, J.W., Harris, M., e Camus, F. orgs., *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the*

World: A Tribute to Richard H. Sillitoe, Society of Economic Geologists, v. 16, doi:10.5382/SP.16.17.

Xavier, R.P., Rusk, B., Emsbo, P., Monteiro, 2009. Composition and source of salinity of ore-bearing fluids in Cu-Au systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. In: SGA Biennial Meeting, 10, pp. 272-274.

Zeh, A., Cabral, A. R., 2021, Combining detrital zircon shape and U–Pb–Hf isotope analyses for provenance studies—An example from the Aquiri region, Amazon Craton, Brazil: Precambrian Research, v. 364, p. 106343, doi:10.1016/j.precamres.2021.106343.