

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Evolução do sistema mineral IOCG–níquel hidrotermal do Cinturão Sul do Cobre,
Província Carajás, com base em análises de LA-ICP-MS *in situ* aplicadas a estudos
geocronológicos e de química mineral

LUIZ FERNANDES DUTRA

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Recursos Minerais e
Hidrogeologia para obtenção do título de
Doutor em Ciências

Área de concentração: Recursos Minerais

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

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Sarah Dare

SÃO PAULO

2024

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

Dutra, Luiz Fernandes Evolução do sistema mineral IOCG-níquel hidrotermal do Cinturão Sul do Cobre, Província Carajás, com base em análises de LA-ICP-MS in situ aplicadas a estudos geocronológicos e de química mineral / Luiz Fernandes Dutra; orientadora Lena Virgínia Soares Monteiro; coorientadora Sarah Dare. - São Paulo, 2024.
295 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2024.

1. Níquel. 2. Cobre. 3. Metalogênese. 4. Geocronologia. 5. Carajás. I. Monteiro, Lena Virgínia Soares, orient. II. Dare, Sarah, coorient.
III. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Evolução do sistema mineral IOCG–níquel hidrotermal do Cinturão Sul do Cobre,
Província Carajás, com base em análises de LA-ICP-MS *in situ* aplicadas a estudos
geocronológicos e de química mineral

LUIZ FERNANDES DUTRA

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

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Sarah Dare

Tese de Doutorado

Nº 675

COMISSÃO JULGADORA

Dr^a. Lena Virgínia Soares Monteiro

Dr. Cleyton de Carvalho Carneiro

Dr^a. Juliana Charão Marques

Dr. Nilson Francisquini Botelho

Dr. André Luiz Silva Pestilho

SÃO PAULO

2024

AGRADECIMENTOS

Esta tese não teria sido finalizada sem o apoio de várias pessoas que me auxiliaram nesses últimos 5 anos em São Paulo. Agradeço, primeiramente, ao apoio da minha família, especialmente minha mãe e meu irmão pela inspiração de força e vida.

À minha orientadora, Lena Monteiro, pelo apoio, confiança, orientação atenciosa e oportunidade de trabalharmos juntos. Sem seus incentivos pela multidisciplinaridade, este trabalho não teria se desenvolvido como está.

À minha coorientadora, Sarah Dare, que me deu total apoio durante minha curta estadia em Chicoutimi e pela continua orientação e aprendizado nos trabalhos de química mineral que desenvolvemos.

Agradeço ao apoio financeiro por meio de projetos colaborativos com a Agência para o Desenvolvimento e Inovação do Setor Mineral Brasileiro (ADIMB) em parceria com a Vale S.A. e Centaurus Metals. Sou grato ao apoio logístico, acesso aos testemunhos de sondagem e as periódicas reuniões com suas equipes que ajudaram no desenvolvimento desta tese. Especial agradecimento à Juliana Araújo (Vale), Fernando Matos (Vale), Gaudius Montresor (Centaurus), Rocky Osborne (Centaurus) e Roger Fitzhardinge (Centaurus) pelo apoio nos campos e discussões dos dados adquiridos.

Gostaria de agradecer ao Dany Savard, Audrey Lavoie e Marie Kieffer da Université du Québec à Chicoutimi pelos ensinamentos na aquisição de dados e operação do LA-ICP-MS e redução de dados no Iolite. Em relação ao Iolite, agradeço aos desenvolvedores desse incrível *software* que facilitou o processamento dos dados composicionais. E ao Bence Paul que forneceu uma licença gratuita para utilização do programa.

Sou grato ao Cesar Ferreira Filho, Eduardo Mansur, Marco Delinardo Silva, Bruno Ribeiro e Carolina Moreto pelo apoio nos trabalhos que desenvolvemos ao longo do meu doutorado e foram integrados nesse volume. Ao Cleyton Carneiro e Rodrigo Teixeira que me apresentaram o mundo do *machine learning* e abriram meus olhos para novas possibilidades.

Aos alunos que me ajudaram a desenvolver parte do meu trabalho e confiaram na minha coorientação em seus trabalhos, Bianca Faria, Veronica Puig, Renan Pereira, Gabriel Lopes e Thiago Ávila.

Um agradecimento especial à família Tuena (Deborah, Matheus e Lucas) que abriram sua casa e abrigaram quando cheguei em São Paulo.

Sou gratíssimo aos meus incríveis amigos que estiveram comigo nos bons e maus momentos. Os maravilhosos Nazaré Barbosa, Dinarte Lucas, Lucas Ferreira, Elis Figueiredo, Armando Oliveira, Giovanna Moreira, Agustin Mors, Brenda Alvarez, Gabriela Serêjo,

Alexandre Ferraz, Kauê Seoane, Liz Tasco, Ravi Sampaio, Alana Dantas, Thiago Rodrigues, Antomat Macêdo, Caro Bedoya, Suellen Campos, Oscar Patroni, Lucas Tuena, Matheus Tuena, Luiz Zoldan, Nilton Souza e Júlia Guimarães.

RESUMO

Dutra, L.F., 2024, Evolução do sistema mineral IOCG–níquel hidrotermal do Cinturão Sul do Cobre, Província Carajás, com base em análises de LA-ICP-MS *in situ* aplicadas a estudos geocronológicos e de química mineral [Tese de Doutorado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 295 p.

A Província Carajás apresenta vários depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG) e níquel hidrotermal (HNi) formados em diferentes épocas metalogenéticas. A sobreposição de padrões de alteração hidrotermal, dificultando a identificação de fontes de metais e fluidos específicos, além de parâmetros úteis para exploração mineral. Os depósitos IOCG (Sossego-Sequeirinho-Pista, Bacaba), IOCG enriquecidos em Ni (Ni-IOCG; Jatobá-Castanha) e HNi (GT-34, Jaguar) foram analisados através de estudos aerogeofísicos, químicos e geocronológicos. Os dados de gamaespectrometria aérea indicaram correlações espaciais com altos valores de razões radiométricas e densidade de morfolineamentos. Os dados magnéticos aerolevantados foram utilizados para mapear estruturas, onde as de direção NW–SE e N–S são importantes em escala regional, enquanto as de NE–SW e E–W controlam as mineralizações localmente, destacando a continuidade das estruturas da crosta profunda à superfície. Essas estruturas provavelmente atuaram como condutos para fluidos hidrotermais nos eventos metalogenéticos. Os minerais traçadores de processos petrogenéticos e metalogenéticos foram analisados por microsonda eletrônica (*e.g.*, escapolita, apatita, magnetita, anfibólio, biotita e clorita) e LA-ICP-MS (*e.g.*, apatita e magnetita) revelando uma mistura de fluidos magmático-hidrotermais hipersalinos com fluidos externamente derivados, com base em $(Cl/(Cl+CO_3))_{Scp} > 0,4$, $(Cl/Br_{molar})_{Scp} \approx 100$, $(XMg_{Bt}) > 0,75$. A fugacidade de halogênio na biotita indica a participação de fluidos hipersalinos sob condições reduzidas no IOCG Neoarqueano ($Eu/Eu^*_{Ap} < 0,4$, $V_{Mag} > 0,2\%$, $Cr_{Mag} > 10ppm$) e oxidadas no IOCG Paleoproterozoico e HNi ($Eu/Eu^*_{Ap} > 0,4$, $V_{Mag} < 0,2\%$, $Cr_{Mag} < 10ppm$). A atividade do flúor foi maior no HNi ($\log(fHF/fHCl) > -3$, $\log(fH_2O/fHF) < 6$). A temperatura dos estágios de mineralização e alteração tardia foi menor no IOCG ($T_{Chl} = 210,5–287,5^\circ C$, $T_{Bt} = 596–617^\circ C$, $T_{Mag} > 300^\circ C$) do que Ni-IOCG ($T_{Chl} = 294,0–338,0^\circ C$, $T_{Bt} = 397–568^\circ C$, $T_{Mag} > 300^\circ C$) e HNi ($T_{Chl} = 261,0–304,0^\circ C$, $T_{Bt} = 545–633^\circ C$, $T_{Mag} < 300^\circ C$). HNi apresenta forte *buffer* das rochas hospedeiras ($(Ti+V)_{Mag} \leq 0,2\%$, $(Cl/Br_{molar})_{Scp} < 50$) com contribuição máfica ($(Mg+Co+Ni)_{Mag} > 0,1\%$, $(Sr/Y)_{Ap} > 0,673$). Em contrapartida, o Ni-IOCG exibe uma assinatura félsica ($\Sigma LREE_{Ap} > 0,1\%$) e baixa interação fluido-rocha ($(Ti+V)_{Mag} > 0,2\%$). Nossos resultados sugerem elementos-chave para a classificação dos depósitos segundo magnetita (Ni, V, Al, Co, Ti, Mg), apatita (Th, Lu, Gd, U, Sr, Y, As), escapolita (Cl, K, Fe, Mg, Ca, Na, La, Y, Eu), anfibólio (Ca, Na, Fe, Al, Mg), biotita (Fe, Al,

Mg, Si) e clorito (Fe, Mg e vacância no local M). As idades U–Pb (apatita, titanita, rutilo e monazita), Lu–Hf (apatita) e Re–Os (molibdenita) indicam que o evento de formação de minério (2,70–2,68 Ga) foi seguido por possíveis eventos hidrotermais em 2,60–2,45, 2,00–1,95 Ga e 0,47 Ga que podem ter contribuído para o *resetting* parcial das idades em apatita. Este estudo destaca a importância do uso de múltiplos geocronômetros e química mineral para desvendar a gênese do minério e o histórico de mobilização.

Palavras-chave: Níquel; Cobre; Metalogênese; Geocronologia U–Pb; Lu–Hf em apatita; Datação Re–Os; Química Mineral; Lineamento magnético; Morfolineamento

ABSTRACT

Dutra, L.F., 2024, Evolution of the hydrothermal IOCG–nickel mineral system of the Southern Copper Belt, Carajás Province, based on in situ LA-ICP-MS analysis applied to geochronological and mineral chemistry studies [Doctoral Thesis], São Paulo, Institute of Geosciences, University of São Paulo, 295 p.

The Carajás Province shows several iron oxide-copper-gold (IOCG) and hydrothermal nickel (HNi) deposits formed during different metallogenic periods. The overlapping patterns of hydrothermal alteration hinder the identification of metal and fluid sources, as well as useful parameters for mineral exploration. The IOCG deposits (Sossego-Sequeirinho-Pista, Bacaba), Ni-rich IOCG (Ni-IOCG; Jatobá-Castanha), and HNi (GT-34, Jaguar) were analyzed through aerogeophysical, chemical, and geochronological studies. The deposits are spatially correlated to high radiometric ratio values and morpholineament density. Airborne magnetic data were used to map structures, where NW–SE and N–S directions are important on a regional scale, while NE–SW and E–W control mineralization locally, highlighting the continuity of deep crustal structures to the surface. These structures likely acted as conduits for hydrothermal fluids in metallogenic events. Trace minerals for petrogenetic and metallogenic processes were analyzed using electron microprobe (e.g., scapolite, apatite, magnetite, amphibole, biotite, and chlorite) and LA-ICP-MS (e.g., apatite and magnetite), revealing a mix of hypersaline magmatic-hydrothermal fluids with externally derived fluids, based on $(Cl/(Cl+CO_3))_{Scp} > 0.4$, $(Cl/Br_{molar})_{Scp} \approx 100$, $(XMg_{Bt}) > 0.75$. Halogen fugacity in biotite indicates the participation of hypersaline fluids under reduced conditions in Neoproterozoic IOCG ($Eu/Eu^*_{Ap} < 0.4$, $V_{Mag} > 0.2\%$, $Cr_{Mag} > 10\text{ppm}$) and oxidized conditions in Paleoproterozoic IOCG and HNi ($Eu/Eu^*_{Ap} > 0.4$, $V_{Mag} < 0.2\%$, $Cr_{Mag} < 10\text{ppm}$). Fluorine activity was higher in HNi ($\log(f_{HF}/f_{HCl}) > -3$, $\log(f_{H_2O}/f_{HF}) < 6$). The temperature of mineralization and late alteration stages was lower in IOCG ($T_{Chl} = 210.5\text{--}287.5^\circ\text{C}$, $T_{Bt} = 596\text{--}617^\circ\text{C}$, $T_{Mag} > 300^\circ\text{C}$) compared to Ni-IOCG ($T_{Chl} = 294.0\text{--}338.0^\circ\text{C}$, $T_{Bt} = 397\text{--}568^\circ\text{C}$, $T_{Mag} > 300^\circ\text{C}$) and HNi ($T_{Chl} = 261.0\text{--}304.0^\circ\text{C}$, $T_{Bt} = 545\text{--}633^\circ\text{C}$, $T_{Mag} < 300^\circ\text{C}$). HNi shows strong buffering by host rocks ($(Ti+V)_{Mag} \leq 0.2\%$, $(Cl/Br_{molar})_{Scp} < 50$) with mafic contributions ($(Mg+Co+Ni)_{Mag} > 0.1\%$, $(Sr/Y)_{Ap} > 0.673$). In contrast, Ni-IOCG exhibits a felsic signature ($\Sigma LREE_{Ap} > 0.1\%$) and low fluid-rock interaction ($(Ti+V)_{Mag} > 0.2\%$). Our results suggest key elements for classifying the deposits according to magnetite (Ni, V, Al, Co, Ti, Mg), apatite (Th, Lu, Gd, U, Sr, Y, As), scapolite (Cl, K, Fe, Mg, Ca, Na, La, Y, Eu), amphibole (Ca, Na, Fe, Al, Mg), biotite (Fe, Al, Mg, Si), and chlorite (Fe, Mg, and vacancy in the M site). U–Pb ages (apatite, titanite, rutile, and monazite), Lu–Hf (apatite), and Re–Os (molybdenite) indicate that the ore formation event (2.70–2.68 Ga) was

followed by hydrothermal events at 2.60–2.45, 2.00–1.95 Ga and 0.47 Ga, which may have contributed to partial age resetting in apatite. This study highlights the importance of using multiple geochronometers and mineral chemistry to unravel ore genesis and mobilization history.

Keywords: Nickel; Copper; Metalogenesis; U–Pb geochronology; Lu–Hf analysis in apatite; Re–Os dating; Mineral chemistry; Magnetic lineament; Morpholineament

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Natureza da pesquisa	15
1.2 Objetivos	17
1.3 Métodos e técnicas.....	18
1.3.1 Revisão bibliográfica.....	18
1.3.2 Aerogeofísica e sensoriamento remoto	18
1.3.3 Trabalhos de Campo	19
1.3.4 Estudos Petrográficos.....	19
1.3.5 Análises composicionais e imageamentos de varredura eletrônica por microsonda	19
1.3.6 Análises composicionais por LA-ICP-MS.....	20
1.3.7 Imageamento TIMA.....	20
1.3.8 Análises de elemento-traços e datação U–Pb e Lu–Hf em apatita.....	21
1.3.9 Análises U–Pb em titanita e rutilo	23
1.3.10 Análise Re–Os em molibdenita	23
1.4 Organização da tese	24
2 CONCLUSÕES.....	25
3 REFERÊNCIAS	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (A) Cráton Amazônico na América do Sul e (B) compartimentação tectônica da Província Carajás (Vasquez et al., 2014; Cordani et al., 2016). (C) Mapa geológico da porção central do domínio Carajás e localização dos depósitos em estudo. Dados morfológicos de Valeriano e Rossetti (2012) e Jarvis et al. (2008). 16

1 INTRODUÇÃO

1.1 Natureza da pesquisa

A Província Carajás, localizada no Cráton Amazônico (Santos et al., 2000; Santos, 2003), destaca-se mundialmente pelos notáveis depósitos de ferro, níquel, ouro, manganês, além dos depósitos cupro-auríferos com características semelhantes às dos depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (*iron oxide-copper-gold deposits* ou IOCG; Hitzman et al., 1992) de classe mundial. Essa classe de depósitos se diferencia das demais por apresentar zonas de substituição e brechas com forte controle estrutural, extensivas zonas de alteração hidrotermal alcalina, elevados conteúdos (>20%) de magnetita e/ou hematita hidrotermal, além de associação do cobre e ouro a concentrações significativas de ETRL, P, Ni, Co, Pd e U nos corpos de minério (Hitzman et al., 1992; Williams et al., 2005; Monteiro et al., 2008b; Groves et al., 2010).

A Província Carajás reflete uma particular evolução geológica que possibilitou a formação de importantes mineralizações polimetálicas (Cu, Au e Ni) no Neoarqueano (*ca.* 2,77–2,74 Ga, 2,72–2,68 e 2,60–2,45 Ga), além de eventos hidrotermais em larga escala no Paleoproterozoico (*ca.* 2,06 e 1,90–1,88 Ga) resultando na formação de novos depósitos e em mobilização de zonas mineralizadas preexistentes (Xavier et al., 2012; Moreto et al., 2015a, 2015b; Costa et al., 2020b; Trunfull et al., 2020). Como consequência, sobreposição de tipos e estilos de alteração hidrotermal pode ser reconhecida nos vários depósitos da província.

Nesse contexto, esse projeto de pesquisa pretende avançar no melhor entendimento do significado das assinaturas químicas características dessas distintas épocas metalogenéticas, visando à identificação dos processos e dos atributos relacionados com a formação dos importantes depósitos de classe mundial e sua distinção dos depósitos subeconômicos.

O estudo foi focado nos depósitos cupríferos Sossego-Sequeirinho-Pista, Jatobá, Castanha e Bacaba (Figura 1), que são parte de um *cluster* de depósitos IOCG no Cinturão Sul do Cobre da Província Carajás, além dos depósitos níquelífero Jaguar e GT-34 (Monteiro et al., 2011; Moreto et al., 2015a, 2015b; Oliveira, 2017; Ferreira Filho et al., 2021; Mansur et al., 2023). Embora possam ter conexão com o mesmo sistema mineral, cada um dos depósitos selecionados apresenta particularidades. Os depósitos Jatobá e Castanha são notáveis por apresentar zonas cupríferas (calcopirita) e zonas enriquecidas em níquel-zinco (pirrotita-Co-pentlandita-esfalerita), espacialmente envelopadas a corpos de magnetita-apatita (Velo, 2017; Velo et al., 2020; Pestilho et al., 2020), semelhantes aos identificados no sistemas IOCG neoarqueanos em Carajás (e.g. Corpo Sequeirinho; Monteiro et al., 2008b; Moreto et al., 2015a). O depósito Jaguar apresenta uma mineralização de níquel sulfetado hidrotermal constituída majoritariamente por pirita e millerita. Os corpos de minério foram brechas

hidrotermais que são envolvidos por zonas de alteração de biotita-clorita e magnetita-apatita-quartzo. Salvo os elevados conteúdos de níquel, essas características são semelhantes às dos depósitos IOCG (Oliveira, 2017; Giustina et al., 2018; Ferreira Filho et al., 2021). Por sua vez, o depósito GT-34 destaca-se pela presença de zonas de alteração hidrotermais com ortopiroxênio-escapolita, hornblenda e flogopita e mineralização hidrotermal de níquel com pirrotita-pentlandita e millerita (Garcia et al., 2020).

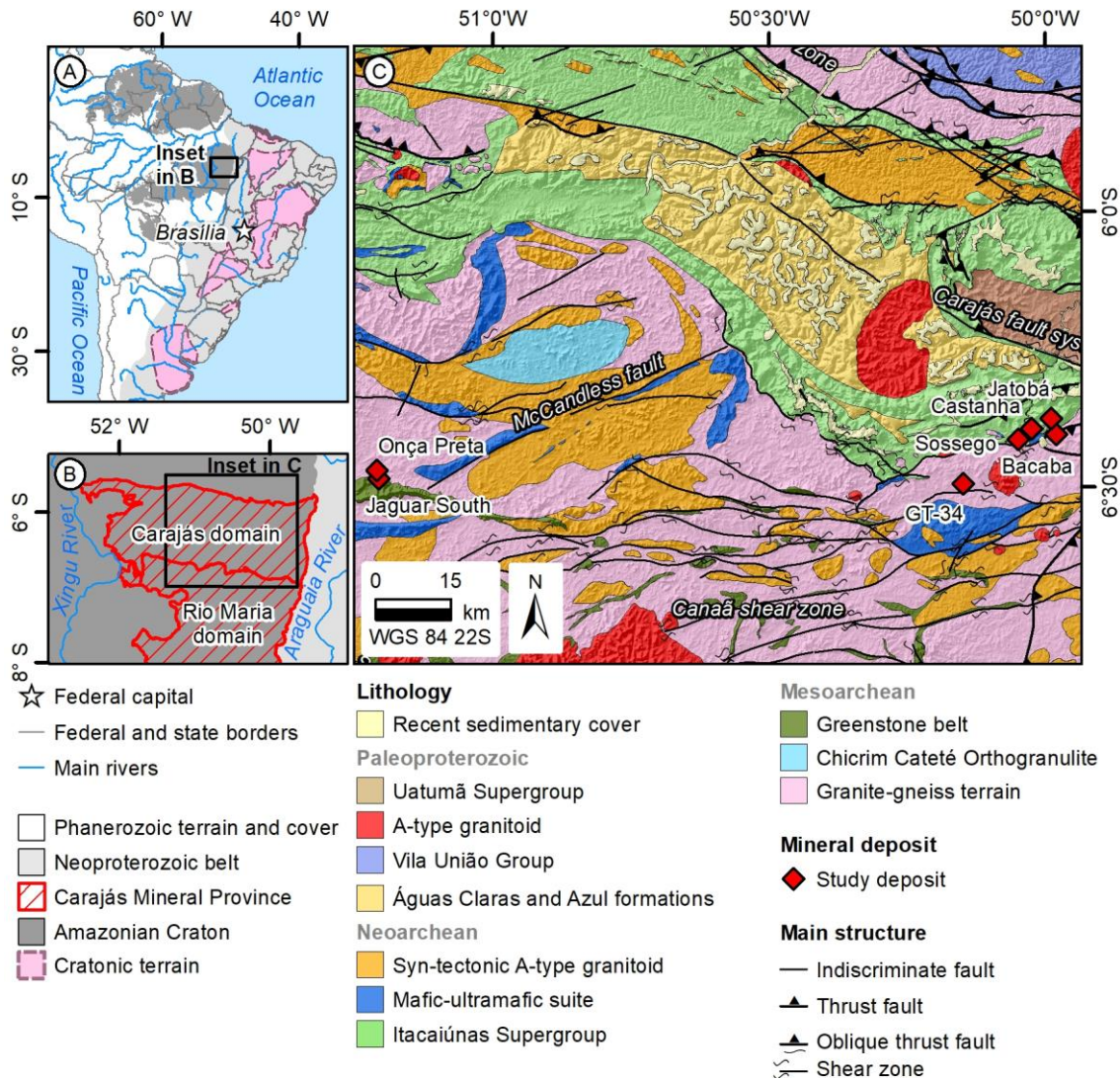


Figura 1. (A) Cráton Amazônico na América do Sul e (B) compartimentação tectônica da Província Carajás (Vasquez et al., 2014; Cordani et al., 2016). (C) Mapa geológico da porção central do domínio Carajás e localização dos depósitos em estudo. Dados morfológicos de Valeriano e Rossetti (2012) e Jarvis et al. (2008).

A caracterização petrográfica, química e geocronológica das rochas hospedeiras desses depósitos, assim como a identificação da evolução paragenética e posicionamento temporal das diferentes gerações fases minerais hidrotermais, em especial magnetita, apatita e escapolita nesses depósitos, permitiu o emprego de técnicas microanalíticas pontuais de alta resolução

(espectrômetro de massa com ablação a laser com plasma indutivamente acoplado (*laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*; LA-ICP-MS). A quantificação dos elementos menores e, em alguns casos, traços em silicatos (escapolita, biotita, anfibólio e clorita), fosfatos (apatita) e óxidos de ferro (magnetita) desses depósitos e datações U–Pb, Lu–Hf e Re–Os possibilitaram reconstituir a evolução do sistema mineral IOCG-níquel hidrotermal.

Apatita, magnetita e escapolita hospedam uma grande quantidade de elementos-traço, incluindo elementos terras raras (ETR), Pb e Sr, e podem potencialmente ser usados na caracterização da composição de elementos-traço do fluido a partir do qual foram formados (Frietsch e Perdahl, 1995; Belousova et al., 2001, 2002; Satish-Kumar et al., 2006). O conteúdo de elementos-traço e assinaturas de ETR nesses minerais dependem da composição química das rochas hospedeiras e do estado de oxidação e pode ajudar tanto na identificação da história de interação fluido-rocha (Satish-Kumar et al., 2006) quanto na avaliação de parâmetros físico-químicos críticos para o transporte e precipitação de metais em sistemas hidrotermais. A origem dos fluidos hidrotermais (*e.g.*, água do mar, bacia continental, fluido magmático, entre outros) e as condições físico-químicas, a natureza e a evolução do sistema hidrotermal podem ser estimadas pela concentração de halogênios na escapolita e apatita (Belousova et al., 2001, 2002; Bouzari et al., 2016; Pirajno, 2018). Já a magnetita é um importante indicador petrogenético, cuja composição e textura reflete mudanças físico-químicas como temperatura, fugacidade de oxigênio e composição do *melt* (Wen et al., 2017), assim as análises *in situ* de elementos-traço são empregados para definir a origem desse mineral (*e.g.*, Dupuis e Beaudoin, 2011; Dare et al., 2014; Knipping et al., 2015; Nadoll et al., 2015; Wen et al., 2017) e, conseqüentemente, determinar a origem ou contribuições para os fluidos hidrotermais.

Dessa forma, esse estudo permitiu reconstruir a história de interação fluido-rocha pelos fluidos hidrotermais e o contexto tectônico para fontes de metais durante o estabelecimento dos sistemas hidrotermais em Carajás em diferentes épocas metalogenéticas, fornecendo importantes subsídios para exploração mineral nessa importante província metalogenética.

1.2 Objetivos

Com o propósito de contribuir para o avanço do conhecimento a respeito de processos geológicos que deram origem aos depósitos IOCG e de níquel hidrotermal na Província Carajás, este estudo tem como objetivo a reconstituição da evolução metalogenética dos depósitos IOCG Sossego-Sequeirinho-Pista, Jatobá, Castanha e Bacaba, e de níquel hidrotermal Jaguar e GT-34 e a caracterização das suas relações espaço-temporais com eventos magmáticos e tectônicos já

registrados na província, a partir da identificação de assinaturas químicas relativas a distintas épocas metalogenéticas registradas em cada depósito.

Dessa forma, esse projeto visou:

- i) Reconhecer as estruturas e seu papel no controle das mineralizações em escala local a regional, bem como a assinatura geofísica das alterações hidrotermais a partir da integração de dados de sensoriamento remoto e aerogeofísica;
- ii) Identificar a evolução paragenética das zonas de alteração hidrotermal e mineralizadas, tendo em vista a questão da sobreposição de eventos hidrotermais em escala de depósito;
- iii) Caracterizar a composição química mineral, incluindo elementos traços e terras raras, em minerais de alteração hidrotermal (escapolita, apatita, magnetita, biotita, clorita e anfibólio);
- iv) Determinar as idades dos eventos mineralizantes e/ou hidrotermais em cada depósito, a partir de datação *in situ* por LA-ICP-MS de monazita, apatita, rutilo, titanita e molibdenita associada a distintos estágios de alteração hidrotermal;
- v) Identificar as evidências de mobilização de elementos traços em zonas de alteração hidrotermal e mineralizadas e caracterização da história de interação fluido-rocha, incluindo fatores físico-químicos associados; e
- vi) Reconhecer as possíveis fontes de metais e trajetórias de migração de fluidos hidrotermais nos distintos eventos metalogenéticos registrados na Província Carajás.

1.3 Métodos e técnicas

1.3.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica foi realizada durante todo o desenvolvimento da pesquisa. A pesquisa teve ênfase nos depósitos IOCG e de níquel hidrotermal da Província Carajás e de outras províncias metalogenéticas do mundo. Nesse sentido, dedicada atenção foi destinada ao estudo de sistemas hidrotermais associados com mecanismos de (re)mobilização associado a sobreposição de eventos, assim como mobilidade geoquímica de elementos e abertura de sistemas isotópicos em sistemas hidrotermais superpostos.

1.3.2 Aerogeofísica e sensoriamento remoto

A análise de dados aerogeofísicos e geomorfológicos podem auxiliar o entendimento da distribuição das fácies hidrotermais e do papel das estruturas no controle das mineralizações em escala regional à local. As razões radiométricas (*e.g.*, K/eTh, eU/eTh, Fator F, K e eU

anômalos) foram utilizadas no mapeamento das zonas de alteração hidrotermal e os lineamentos magnéticos e morfoestruturais na identificação de estruturas rasas e profundas. Por fim, foi avaliado o papel dos lineamentos para a história metalogenética do Domínio Carajás com base em suas relações com as áreas com conteúdo de radioelementos anômalos (*i.e.*, áreas hidrotermalmente alteradas), estruturas mapeadas em superfície (*e.g.*, zonas de cisalhamento, falhas, etc) e a distribuição espacial dos depósitos IOCG. Os bancos de dados são de acesso livre e fornecidos pelo Serviço Geológico do Brasil (GSB/CPRM) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

1.3.3 Trabalhos de Campo

As etapas de trabalho de campo foram realizadas em junho de 2019, dezembro de 2021 e abril de 2022 visando à descrição detalhada e sistemática de testemunhos de sondagem dos depósitos Jaguar, Castanha e GT-34 e coletas de amostras da mina Sossego com ênfase na caracterização dos litotipos hospedeiros, a identificação de estilos e geometria das zonas de alteração hidrotermal, a identificação 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 nos depósitos, além de coleta sistemática de amostras, em adição às previamente já coletadas.

1.3.4 Estudos Petrográficos

Estudos petrográficos em luz transmitida e refletida foram desenvolvidos em lâminas delgadas-polidas confeccionadas a partir de amostras previamente selecionada de testemunhos de sondagem. Esses estudos visaram à caracterização mais detalhada de fases minerais apropriadas aos estudos químicos e datação geocronológica, incluindo seu modo de ocorrência, associação paragenética, relação temporal com hidrotermalismo e mineralização. Os estudos foram realizados nos laboratórios de Petrografia Sedimentar e GeoFluid - Caracterização de Fluidos em Sistemas Geológicos do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP).

1.3.5 Análises composicionais e imageamentos de varredura eletrônica por microsonda

Antes das análises de elementos maiores e menores por microsonda eletrônica foi realizado o imageamento por elétrons retroespalhados com objetivo a caracterização detalhada das fases minerais e o estabelecimento de controles rígidos sobre as relações microestruturais e texturais dos minerais com suas variações químicas. As análises de elementos maiores e

menores em anfibólio, biotita, clorita, escapolita, magnetita e apatita foram realizadas utilizando um analisador de microsonda eletrônica JEOL JXA-8530F equipado com cinco espectrômetros WDS e um espectrômetro EDS no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. As condições analíticas foram tensão de 15 kV, corrente de 20 nA e feixe de elétrons de 5 μm de diâmetro, exceto para análise de apatita, que utilizou aceleração de tensão de 20 kV. As demais condições de análise estão resumidas no material suplementar.

1.3.6 Análises composicionais por LA-ICP-MS

A concentração dos elementos menores e traços em escapolita, magnetita e apatita foram determinadas por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado por ablação a laser (LA-ICP-MS) no *Laboratoire des Matériaux Terrestres (LabMaTer), Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)*, usando um sistema de ablação a laser Excimer 193nm RESOLUTION M-50 (*Australian Scientific Instrument*) equipado com uma célula de duplo volume S-155 (Laurin Technic) e acoplado a um espectrômetro de massa Agilent 7900 ICP-MS.

Os parâmetros para aquisição das análises LA-ICP-MS foram frequência de laser de 10Hz, potência de 5mJ/pulso, tempo de permanência de 7,5ms, velocidade de varredura de 5–10 $\mu\text{m/s}$ e fluência de 5J/cm². As análises na superfície dos cristais foram realizadas com tamanhos de feixe de 25 ou 55 μm , dependendo do tamanho do cristal. O gás branco foi medido por 30 segundos antes de ligar o laser, que funcionou por pelo menos 60 segundos. O material ablacionado foi transportado para o ICP-MS por uma mistura de gás Ar-He a uma taxa de 0,8–1,0L/min para Ar, 350mL/min para He e 2mL/min de nitrogênio foram adicionados à mistura. Nas análises de apatita e escapolita, o material de referência certificado NIST610 foi utilizado para calibração, e materiais de referência secundários (NIST612, GSD e apatita interna UQAC-APA) foram utilizados para monitorar a qualidade dos dados. Nas análises de magnetita, GSE-1 foi utilizado para calibrar todos os elementos, enquanto GSD-1 g, G-probe 6, BC-28, UQAC-FeS5, ILM454 e NIST610, NIST616 e NIST614 foram utilizados como materiais de referência de controle de qualidade para monitorar a calibração do GSE-1 g.

1.3.7 Imageamento TIMA

Antes da análise isotópica e de elementos traços, sete seções delgadas polidas foram digitalizadas com TIMA (analisador mineral integrado TESCAN) no *Microscopy and Microanalysis Facility of the John de Laeter Centre, Curtin University*, para caracterizar a

assembleia mineral de todas as amostras. O mapeamento TIMA foi realizado com uma tensão de aceleração de 25 kV, uma intensidade de feixe de 19, uma corrente de 6,74–7,01 nA, um tamanho do *spot* de 67–90 nm e uma distância nominal de trabalho de 15 mm. Um padrão de Mn puro foi utilizado para padronização dos espectros de EDS. Análises de retroespalhamento de elétrons (BSE) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) foram referenciadas a uma biblioteca mineral para classificação automática de minerais.

1.3.8 Análises de elemento-traços e datação U–Pb e Lu–Hf em apatita

Análises *in situ* U–Pb acompanhadas por elementos traços em apatita foram realizadas em seções delgada-polidas por meio de espectrômetro de massa de plasma indutivamente acoplado por ablação a laser (LA-ICP-MS) no *GeoHistory Facility, John de Laeter Center, Curtin University*.

A configuração analítica inclui um laser excimer RESOLution LR equipado com uma célula Laurin Technic S155 conectada a um ICP-MS Agilent 7900s para medição simultânea de isótopos U–Pb e elementos traços. A análise da apatita foi realizada com tamanho de *spot* de 33 μm , taxa de repetição de 5 Hz e energia do laser de 2,7 J/cm^2 medida acima da célula do laser. O material ablaçado foi transportado por uma mistura de He (320 ml/min) e N₂ (1,2 ml/min) de pureza ultra-alta, ambos os quais foram passados através de uma armadilha de Hg em linha. Cada análise consistiu em 30s de aquisição de linha de base, seguidos de 30s de aquisição de dados amostrais e outros 15s de contagem de linha de base. McClure Mountain (Schoene e Bowring, 2006) e o vidro internacional NIST610 foram empregados como material de referência primário para isótopos U–Pb e concentração dos elementos traços. Apatita Madagascar (Thomson et al., 2012), apatita FC-Duluth (Schmitz et al., 2003) e o vidro internacional NIST612 foram empregados como material de referência secundário e tratados como desconhecidos. A redução de dados foi realizada usando Iolite 4 (Paton et al., 2011) usando o esquema de redução de dados 'VizualAge UComPbine' (Chew et al., 2014) com equação linear para corrigir o fracionamento isotópico e redução de dados. Os diagramas UPb foram calculados usando IsoplotR (Vermeesch, 2018) com incertezas apresentadas com erros de 2 desvios padrão. As idades de intercepto inferior foram calculadas usando uma rotina interativa que considera o conteúdo de Pb comum assumindo o modelo de evolução de Pb terrestre de Stacey e Kramers (1975) (Thomson et al., 2012; seguindo Kirkland et al., 2018; Ribeiro et al., 2020).

A apatita Madagascar produziu uma data de interceptação inferior de regressão ancorada de 467 ± 5 Ma (MSWD = 1,3, N = 20, primeira sessão) e 476 ± 5 Ma (MSWD = 1,7, N = 21,

segunda sessão) usando um $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ inicial de 0,86 assumindo o modelo de Stacey e Kramers. A apatita FC-Duluth produziu uma idade de interceptação inferior de regressão ancorada de 1070 ± 14 Ma (MSWD = 0,9, N = 20, primeira sessão) e 1091 ± 17 Ma (MSWD = 1,4, N = 19, segunda sessão) usando um $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}_{\text{inicial}}$ de 0,91, consistente com idades de referência e reprodutividade pelo laboratório anteriormente (Ribeiro et al., 2023). As concentrações de elemento traço indicam uma precisão superior a 5% em comparação com os valores de referência. Para fins de normalização, utilizamos ^{43}Ca como padrão interno para elemento traço de apatita, assumindo uma proporção estequiométrica média. Os dados de elementos traços dos materiais de referência empregados neste estudo são consistentes com os valores de referência publicados (Ribeiro et al., 2023). O conjunto completo de dados de apatita U–Pb e elementos traços está disponível no material suplementar.

As análises Lu–Hf *in situ* em apatita foram realizadas em seções delgadas-polidas usando um laser excimer RESOLution LR equipado com uma célula Laurin Technic S155 acoplada a um Agilent 8900 ICP-MS/MS no GeoHistory Facility, John de Laeter Center, Curtin University. Um dispositivo de mistura 'lula' (Laurin Technic) foi usado para suavizar os pulsos de aerossol entre o laser e o espectrômetro de massa. Os isótopos Lu-Hf foram coletados usando gás de reação NH_3 (10% NH_3 , 90% He) na célula de colisão seguindo Simpson et al. (2021). As condições analíticas estão resumidas na Tabela 1. A redução de dados foi realizada usando Iolite 4 (Paton et al., 2011) usando um esquema interno de redução de dados. As isócronas e idades Lu-Hf foram calculadas usando IsoplotR (Vermeesch, 2018) usando um modelo de máxima verossimilhança e a constante de decaimento Lu após Söderlund et al. (2004). Todas as idades e incertezas são apresentadas com nível de confiança de 2 desvio padrão.

O vidro NIST610 foi usado como material de referência primário com composições assumidas de $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ e $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ de $0,1379 \pm 0,0005$ e $0,282122 \pm 0,000009$ (Nebel et al., 2009). Para verificar possíveis erros sistemáticos da conversão pulso/analógico (P/A) no sistema de detector 8900 para Lu/Hf, realizamos medições repetidas do NIST610 usando vários tamanhos de ponto e modos de detector para ^{175}Lu (50 e 75 microns). Para verificar ainda mais erros sistemáticos devido à incompatibilidade de matriz entre os vidros de silicato do NIST e a apatita, analisamos dois materiais de referência de apatita (Bamble e Ap-222) de idades Lu-Hf conhecidas de 1097 ± 5 Ma (Kharkongor et al., 2023) e 2620 ± 63 Ma (Gillespie et al., 2022), respectivamente. A apatita Bamble e Ap-22 produziram datas Lu-Hf inversas de 1094 ± 57 Ma (N = 14, MSWD = 1,2) e 2615 ± 29 Ma (N = 14, MSWD = 1,2), de acordo com as idades esperadas.

1.3.9 Análises U–Pb em titanita e rutilo

Para as análises isotópicas U–Pb, os cristais de titanita e rutilo foram separados com microretífica e selecionados manualmente em estereomicroscópio Olympus DF Plan 1,5x e montados em bloco com 4 ml de resina e 0,5 ml de curador. As medições foram realizadas na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) utilizando um sistema de ablação a laser (Photon Machines Excite 193 com HelEx de dois volumes) acoplado a um ICP-MS (Thermo Scientific Element XR). O laser foi configurado com frequência de 10 Hz, tamanho de spot de 25 μm e fluência de 7 J/cm^2 . O tempo de ablação foi de 6s (20s para branco de gás e 40s para ablação de amostra). Os dados foram coletados para as massas 202, 204, 206, 207, 208, 232, 235 e 238 usando os modos de contagem de íons do detector SEM, exceto para as massas 232 e 238, que foram analisadas em contagem combinada de íons e modo analógico. Quatro pontos foram medidos por pico de massa, e os respectivos tempos de permanência por massa foram 4, 8, 4, 16, 4, 4, 4 e 4 ms. Na redução dos dados de titanita, os materiais de referência MKED-1 (Spandler et al., 2016) e Khan-1 (Mazoz et al., 2022) foram utilizadas para calibração externa e controle de qualidade, respectivamente, enquanto para rutilo, foram utilizados R10 e R19 (Luvizotto et al., 2009). Os dados foram reduzidos offline usando Iolite 4 (Paton et al., 2011). O conjunto de dados está disponível no Material Suplementar.

1.3.10 Análise Re–Os em molibdenita

As análises Re–Os foram realizadas no *Canadian Centre for Isotopic Microanalysis* da *University of Alberta*. Os métodos utilizados para análise de molibdenita são descritos detalhadamente por Selby e Creaser (2004). Áreas de cada amostra com molibdenita visível foram removidas, e a preparação de um mineral de molibdenita separado foi feita por britagem e peneiramento sem metal, seguido por métodos de concentração magnética e gravitacional. As concentrações de ^{187}Re e ^{187}Os na molibdenita foram determinadas por espectrometria de massa por diluição isotópica usando tubo Carius, extração por solvente, cromatografia de ânions e técnicas de espectrometria de massa por ionização térmica negativa. Para este trabalho, foi utilizado um pico duplo misto contendo quantidades conhecidas de análise de ^{185}Re , ^{190}Os e ^{188}Os isotopicamente enriquecidos (Markey et al., 2007). A análise isotópica utilizou um espectrômetro de massa ThermoScientific Triton da Faraday Collector. O total de espaços em branco processuais para Re e Os é inferior a <3 pg e 2 pg, respectivamente, que são insignificantes em comparação com as concentrações de Re e Os na molibdenita. O material de referência 8599 Henderson (Markey et al., 2007) é rotineiramente analisado como um padrão, e durante os últimos 8 anos retornou uma data Re–Os média de $27,78 \pm 0,07$ Ma ($n=37$),

indistinguível da idade de referência de $27,66 \pm 0,1$ Ma (Wise e Watters, 2011). A constante de decaimento ^{187}Re usada é $1.666 \cdot 10^{-11}$ /ano (Smoliar et al., 1996).

1.4 Organização da tese

Esta tese apresentação a revisão do arcabouço teórico sobre a geologia da Província Carajás no Capítulo 2 e sobre os depósitos IOCG e de níquel hidrotermal no Capítulo 3. O Capítulo 4 é um artigo publicado no periódico *Journal of Applied Geophysics*.

Os Capítulos 5 e 6 constituem dois artigos sobre a aplicação de química mineral no estudo de depósitos IOCG e de níquel hidrotermal na Província Carajás. O Capítulo 7 apresenta os resultados e interpretações sobre as datações em apatita, monazita, titanita, rutilo e molibdenita associados aos sistemas hidrotermais na Província Carajás. Já o Capítulo 8 sumariza as principais conclusões desta tese.

2 CONCLUSÕES

As principais conclusões quanto ao controle estrutural, aos processos hidrotermais e às condições de mineralização para os depósitos IOCG, IOCG enriquecidos em níquel e de níquel hidrotermal na Província Carajás são sumarizadas a seguir:

1. Os depósitos IOCG, IOCG enriquecidos em Ni e de Ni hidrotermal são espacialmente correlacionados às áreas enriquecidas em K e eU e com alta densidade de morfolineamentos, cujos valores superam a soma da média ao desvio padrão ($\geq \bar{x} + s_x$);
2. As estruturas orientadas segundo as direções NE–SW e E–W exercem um controle local dos depósitos, enquanto o controle regional é dominado pelas estruturas com direção N–S e NW–SE;
3. As composições da escapolita hidrotermal sugerem o envolvimento de fluidos altamente salinos de derivação mantélica ou fluidos magmático-hidrotermais com assimilação de material crustal nos depósitos IOCG enriquecidos em Ni (depósitos Castanha e Jatobá) e GT-34;
4. A alta concentração de Cl nos anfibólios e a fugacidade dos halogênios na biotita indicam que os depósitos foram gerados por fluidos hipersalinos com Cl e F em condições reduzidas a oxidantes.
5. A atividade de flúor, indicada por $(\log(f_{\text{HF}}/f_{\text{HCl}}) > -3$ e $\log(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HF}}) < 6$), foi mais elevada nos depósitos de níquel hidrotermal;
6. Fluidos mais oxidados foram envolvidos nos depósitos IOCG pleoproterozoicos (e.g., Sossego) e especialmente nos depósitos de níquel hidrotermal (Jaguar e GT-34), como indicado pela composição química da biotita, apatita e magnetita;
7. A alteração potássica nos depósitos de níquel hidrotermal foi formada em temperatura (>545 °C) semelhante à alteração inicial no depósito de Jatobá (558 ± 50 °C) e superior à temperatura isotópica para alteração potássica no corpo Sossego. Estas condições de temperatura permaneceram estáveis durante a substituição pervasiva pela biotita nos depósitos GT-34 e Jatobá;
8. As temperaturas estimadas sugerem que os depósitos IOCG ($210,5$ – $287,5$ °C em clorita, > 300 °C em magnetita) foram formadas em temperaturas mais baixas em comparação com os depósitos IOCG enriquecidos em Ni ($294,0$ – $338,0$ °C em clorita, > 300 °C em magnetita) e de níquel hidrotermal ($261,0$ – $304,0$ °C em clorita, < 300 °C em magnetita);
9. As composições de apatita e magnetita no sistema hidrotermal da Província Carajás sugerem uma natureza heterogênea entre os diferentes tipos de depósitos. Isso envolve a ascensão de fluidos mineralizantes hipersalinos de alta temperatura, que evoluem para

- condições de temperatura mais baixas por meio de reações fluido-rocha e mistura com fluidos diluídos de baixa temperatura;
10. A interação fluido-rocha foi moderada à intensa com as rochas hospedeiras dos depósitos de níquel hidrotermal ($Ti + V \leq 0,2\%$ em magnetita, razão $Cl/Br_{molar} < 50$ em escapolita) com significativa contribuição máfica (alto teor de $Mg + Co + Ni$ em magnetita; $Sr/Y > 0,673$ em apatita). Em contraste, os depósitos IOCG enriquecidos em Ni exibem uma assinatura magmática félsica (alto teor de $\Sigma LREE$ na apatita) sem interação significativa entre fluido e rocha ($Ti + V > 0,2\%$ em magnetita);
 11. Os seguintes parâmetros são recomendados para classificar os tipos de depósito com base na composição química do mineral: Cl, K, Fe, Mg Ca, Al, Eu, La e Y em escapolita; Ca, Na Fe, Mg, Al, em anfibólio; Fe, Al, Si e Mg em biotita; Fe, Mg e vacância no sítio M em clorita; Ni, V, Al Co, Ti e Mg em magnetita; Th, Lu, Gd, U, Sr, Y e As em apatita; e
 12. As datações U–Pb em apatita, titanita, rutilo e monazita, Lu–Hf em apatita e Re–Os em molibdenita indicam que o evento IOCG neoarqueano (ca. 2,70-2,68 Ga) foi seguido por múltiplos eventos hidrotermais vinculados à reativação regional de falhas no Neoarqueano (ca. 2,60-2,54 Ga, Paleoproterozoico (ca. 2,38–2,27Ga; 2,09–2,06 Ga e 1,91–1,77 Ga) e no Neoproterozoico (ca. 633 Ma);
 13. Este estudo demonstrou a importância de aplicação de múltiplos geocronômetros com distintas temperaturas de fechamento para desvendar uma complexa história de circulação de fluidos responsável por formação de depósitos IOCG no Neoarqueano e por mobilização mecânica assistida por fluidos hidrotermais de corpos de minério de níquel durante os estágios colisionais e de colapso do Orógeno Transamazônico no Paleoproterozoico.

3 REFERÊNCIAS

- Almeida, C.M. de, Olivo, G.R., e Carvalho, S.G. de, 2007, The Ni-Cu-PGE sulfide ores of the komatiite-hosted Fortaleza de Minas deposit, Brazil: Evidence of hydrothermal remobilization: Canadian Mineralogist, v. 45, p. 751–773, doi:10.2113/gscanmin.45.4.751.
- Althoff, F.J., Barbey, P., e Boullier, A.M., 2000, 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: The Archaean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil): Precambrian Research, v. 104, p. 187–206, doi:10.1016/S0301-9268(00)00103-0.
- Amaral, G., 1974, Geologia pré-cambriana da região amazônica [Tese de Livre Docência]:

- Universidade de São Paulo, 212 p., doi:10.11606/T.44.2016.tde-24062016-160651.
- Amaral, G., 1984, Províncias Tapajós e Rio Branco, *in* Almeida, F.F.M. de. e Hasui, Y. orgs., O Pré-Cambriano do Brasil, São Paulo, Blücher, p. 6–35.
- Araújo Filho, R.C., 2018, O Grupo Águas Claras da Serra dos Carajás, Paleoproterozoico do Cráton Amazônico : fácies, litoestratigrafia e sequências deposicionais: Universidade Federal do Pará, 82 p., <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10448>.
- Araújo Filho, R.C., Nogueira, A.C.R., e Araújo, R.N., 2020, 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, doi:10.1016/j.jsames.2020.102665.
- Araújo, O.J.B., e Maia, R.G.N., 1991, Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A: Estado do Pará. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para a Área do Programa Grande Carajás: Brasília, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 135 p., <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/8448>.
- Araújo, R., e Nogueira, A., 2019, Serra Sul diamictite of the Carajás basin (Brazil): A Paleoproterozoic glaciation on the Amazonian craton: *Geology*, v. 47, p. 1166–1170, doi:10.1130/G46923.1.
- Araújo, R.N., e Sousa, M.J. de, 2018, Áreas de relevante interesse mineral – Província Mineral de Carajás, PA: estratigrafia e Análise do Minério de Mn de Carajás – Área Azul, Sereno, Buritirama e Antônio Vicente: Belém, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 198 p., <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20421>.
- Barbosa, O., Ramos, J.R. de A., Gomes, F. de A., e Helmbold, R., 1966, Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do “Projeto Araguaia”: Rio de Janeiro, Ministerio das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, v. Monografia, 94 p.
- Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., e Palma, G., 2017, Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach: *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 62–78, doi:10.1016/j.oregeorev.2016.10.016.
- Barros, C.E. de M., Sardinha, A.S., Barbosa, J. dos P. de O., Macambira, M.J.B., Barbey, P., e Boullier, A.-M., 2009, Structure, petrology, geochemistry and zircon U/Pb and Pb/Pb geochronology of the synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type granites from the Carajás metallogenic Province, Northern Brazil: *Canadian Mineralogist*, v. 47, p. 1423–1440, doi:10.3749/canmin.47.6.1423.

- Barton, M.D., 2014, Iron Oxide(-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems, *in* Treatise on Geochemistry, Elsevier, v. 13, p. 515–541, doi:10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2.
- Barton, M.D., e Johnson, D.A., 1996, Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization: *Geology*, v. 24, p. 259–262, doi:10.1130/0091-7613(1996)024<0259:ESMFIR>2.3.CO;2.
- Bastrakov, E.N., Skirrow, R.G., e Davidson, G.J., 2007, Fluid evolution and origins of iron oxide Cu-Au prospects in the Olympic Dam district, Gawler Craton, South Australia: *Economic Geology*, v. 102, p. 1415–1440, doi:10.2113/gsecongeo.102.8.1415.
- Beisiegel, V. de R., Bernardelli, A.L., Drummond, N.F., Ruff, A.W., e Tremaine, J.W., 1973, Geologia e recursos minerais da serra dos Carajás: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 3, p. 215–242, <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/12491>.
- 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.
- Bettencourt, J.S. et al., 2016, Metallogenic systems associated with granitoid magmatism in the Amazonian Craton: An overview of the present level of understanding and exploration significance: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 68, p. 22–49, doi:10.1016/j.jsames.2015.11.014.
- Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Gonçalves, J.H., Baars, F.J., Delgado, I. de M., Abram, M.B., Neto, R.L., Matos, G.M.M. de, e Santos, J.O.S., 2002, Geologia e Recursos Minerais da Amazônia Brasileira: Sistema de Informações Geográficas - SIG e Mapa na escala 1:1.750.000: Brasília, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/5150>.
- Boggs, S., 2006, Principles of sedimentology and stratigraphy (S. Boggs, Org.): Pearson Prentice Hall, 662 p.
- Bouzari, F., Hart, C.J.R., Bissig, T., e Barker, S., 2016, Hydrothermal alteration revealed by apatite luminescence and chemistry: A potential indicator mineral for exploring covered porphyry copper deposits: *Economic Geology*, v. 111, p. 1397–1410, doi:10.2113/econgeo.111.6.1397.
- Cabral, A.R. et al., 2013, Trace-element and multi-isotope geochemistry of Late-Archean black

- shales in the Carajás iron-ore district, Brazil: *Chemical Geology*, v. 362, p. 91–104, doi:10.1016/j.chemgeo.2013.08.041.
- Cabral, A.R., Bühn, B., Seabra Gomes, A.A., Galbiatti, H.F., Lehmann, B., e Halder, S., 2017, Multiple sulfur isotopes from the Neoproterozoic Serra Sul black shale, Carajás mineral province, northern Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 79, p. 377–383, doi:10.1016/j.jsames.2017.08.002.
- Capistrant, P.L., Hitzman, M.W., Wood, D., Kelly, N.M., Williams, G., Zimba, M., Kuiper, Y., Jack, D., e Stein, H., 2015, Geology of the enterprise hydrothermal nickel deposit, North-Western Province, Zambia: *Economic Geology*, v. 110, p. 9–38, doi:10.2113/econgeo.110.1.9.
- Carranza, E.J.M., de Souza Filho, C.R., Haddad-Martim, P.M., Nagayoshi, K., e Shimizu, I., 2019, Macro-scale ore-controlling faults revealed by micro-geochemical anomalies: *Scientific Reports*, v. 9, p. 4410, doi:10.1038/s41598-019-41019-1.
- Cawood, P.A., e Hawkesworth, C.J., 2015, Temporal relations between mineral deposits and global tectonic cycles: *Geological Society Special Publication*, v. 393, p. 9–21, doi:10.1144/SP393.1.
- Chen, H., 2013, External sulphur in IOCG mineralization: Implications on definition and classification of the IOCG clan: *Ore Geology Reviews*, v. 51, p. 74–78, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.12.002.
- Chew, D.M., Petrus, J.A., e Kamber, B.S., 2014, U-Pb LA-ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb: *Chemical Geology*, v. 363, p. 185–199, doi:10.1016/j.chemgeo.2013.11.006.
- Cordani, U.G., 1981, Comentários sobre as determinações geocronológicas da região da Serra dos Carajás [Relatório Interno]: Universidade de São Paulo-Docegeo.
- Cordani, U.G., Ramos, V.A., Fraga, L.M., Cegarra, M., Delgado, I., Souza, K.G. de, Gomes, F.E.M., e Schobbenhaus, C., 2016, Tectonic map of South America. Mapa tectônico da América do Sul. Scale 1:5.000.000: Paris, CGMW-CPRM-SEGEMAR, <https://ccgm.org/en/home/177-carte-tectonique-de-l-amerique-du-sud-9782917310267.html>.
- Cordani, U.G., e Teixeira, W., 2007, Proterozoic accretionary belts in the Amazonian Craton, *in* Hatcher Jr., R.D., Carlson, M.P., McBride, J.H., e Catalán, J.R.M. orgs., 4-D Framework of Continental Crust, *Geological Society of America*, v. 200, p. 297–320, doi:10.1130/2007.1200(14).
- Corriveau, L., Montreuil, J.F., e Potter, E.G., 2016, Alteration facies linkages among iron oxide

copper-gold, iron oxide-apatite, and affiliated deposits in the Great Near magmatic zone, Northwest Territories, Canada: *Economic Geology*, v. 111, p. 2045–2072, doi:10.2113/econgeo.111.8.2045.

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, e 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>.

Costa, I.S.L., Rocha, M.P., Klein, E.L., e Vasquez, M.L., 2020a, Lithospheric structure of the southern Amazonian Craton from multiple-frequency seismic tomography: Preliminary insights on tectonic and metallogenic implications: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 101, p. 102608, doi:10.1016/j.jsames.2020.102608.

Costa, F.G., Santos, P.A. dos, Serafim, I.C.C. de O., Costa, I.S.L., e Roopnarain, S., 2020b, From Mesoarchean drips to modern-style tectonics in the Carajás Province, Amazonian Craton: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 104, p. 102817, doi:10.1016/j.jsames.2020.102817.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2004a, Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Boa Vista: folha NA.20 - Roraima: folha NB.20. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.: Brasília, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/4963>.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2004b, Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Manaus: folha SA.20. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.: Brasília, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/4967>.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2004c, Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Tumucumaque: folha NA.21. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.: Brasília, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/4964>.

Craveiro, G.S., Xavier, R.P., e Villas, R.N.N., 2019, The Cristalino IOCG deposit: an example of multi-stage events of hydrothermal alteration and copper mineralization: *Brazilian Journal of Geology*, v. 49, p. 1–18, doi:10.1590/2317-4889201920180015.

Dall’Agnol, R., Cunha, I.R.V. da, Guimarães, F.V., Oliveira, D.C. de, Teixeira, M.F.B., Feio, G.R.L., e Lamarão, C.N., 2017, Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites: *Lithos*, v. 277, p. 3–32, doi:10.1016/j.lithos.2016.09.032.

Dall’Agnol, R., Oliveira, M.A., Almeida, J.A.C., Althoff, F.J., Leite, A.A.S., Oliveira, D.C., e Barros, C.E.M., 2006, Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás

- Metallogenic Province, eastern Amazonian craton, *in* Symposium on magmatism, crustal evolution and metallogenesis of the Amazonian Craton, Belém, PA, p. 99–105.
- Dare, S.A.S., Barnes, S.J., Beaudoin, G., Méric, J., Boutroy, E., e Potvin-Doucet, C., 2014, Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators: *Mineralium Deposita*, v. 49, p. 785–796, doi:10.1007/s00126-014-0529-0.
- Day, W.C., Slack, J.F., Ayuso, R.A., e Seeger, C.M., 2016, Regional geologic and petrologic framework for iron oxide \pm apatite \pm rare earth element and iron oxide copper-gold deposits of the mesoproterozoic St. Francois Mountains Terrane, Southeast Missouri, USA: *Economic Geology*, v. 111, p. 1825–1858, doi:10.2113/econgeo.111.8.1825.
- Dias, G.S., Macambira, M.B., Dall'Ágno, R., Soares, A.D.V., e Barro, C.E.M., 1996, Datações de zircões de sill de metagabro: comprovação de idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás, Pará, *in* Simpósio de Geologia da Amazônia, 5, Belém, PA, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 376–378.
- DOCEGEO, 1988, Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais, *in* Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, PA, SBG, p. 11–54.
- Domingos, F.H.G., 2009, The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego-Sequeirinho deposits, Carajás – Brazil [PhD thesis]: Durham University, 483 p., <http://etheses.dur.ac.uk/144/>.
- Dreher, A.M., Xavier, R.P., e Martini, S.L., 2005, As rochas fragmentárias do depósito de Cu-Au de Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás, Brasil: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, p. 359–368, <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9447>.
- Dupuis, C., e Beaudoin, G., 2011, Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types: *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 319–335, doi:10.1007/s00126-011-0334-y.
- Ehrig, K., McPhie, J., e Kamenetsky, V., 2012, Geology and Mineralogical Zonation of the Olympic Dam Iron Oxide Cu-U-Au-Ag Deposit, South Australia, *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, p. 237–26, doi:10.5382/SP.16.11.
- Fabre, S., Nédélec, A., Poitrasson, F., Strauss, H., Thomazo, C., e 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:

Chemical Geology, v. 289, p. 124–139, doi:10.1016/j.chemgeo.2011.07.019.

Faustinoni, J.M., 2017, Migmatitos do Complexo Xingu na porção nordeste do Domínio Carajás, Cráton Amazônico, Brasil [Dissertação de mestrado]: Universidade Estadual de Campinas, 63 p., repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/332778.

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., e Santos, P.A., 2012, 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, doi:10.1016/j.lithos.2012.02.020.

Feio, G.R.L., Dall’Agnol, R., Dantas, E.L., Macambira, M.J.B., Santos, J.O.S., Althoff, F.J., e 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*, v. 227, p. 157–185, doi:10.1016/j.precamres.2012.04.007.

Ferreira Filho, C.F., Ferraz de Oliveira, M.M., Mansur, E.T., e Rosa, W.D., 2021, The Jaguar hydrothermal nickel sulfide deposit: Evidence for a nickel-rich member of IOCG-type deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 111, p. 103501, doi:10.1016/j.jsames.2021.103501.

Fisher, L.A., e Kendrick, M.A., 2008, Metamorphic fluid origins in the Osborne Fe oxide–Cu–Au deposit, Australia: Evidence from noble gases and halogens: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 483–497, doi:10.1007/s00126-008-0178-2.

Frietsch, R., e Perdahl, J.A., 1995, Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types: *Ore Geology Reviews*, v. 9, p. 489–510, doi:10.1016/0169-1368(94)00015-G.

Gabriel, E.O., 2012, Geologia, geoquímica e petrologia magnética dos granitoides Arqueanos da Porção Nordeste de Água Azul do Norte - Província Carajás [Dissertação de mestrado]: Universidade Federal do Pará, 117 p., <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11658>.

Galarza, M.A., e Macambira, M.J.B., 2002, Petrologia e geocronologia das rochas encaixantes do depósito de Cu-Au Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás, Pará Brasil, *in* Klein, E.L., Vasquez, M.L., e Rosa-Costa, L.T. da orgs., *Contribuições à Geologia da Amazônia*, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 3, p. 153–168.

Galarza, M.A., Macambira, M.J.B., e Villas, R.N., 2008, Dating and isotopic characteristics (Pb and S) of the Fe oxide-Cu-Au-U-REE Igarapé Bahia ore deposit, Carajás mineral province, Pará state, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 25, p. 377–397, doi:10.1016/j.jsames.2007.07.006.

Galarza Toro, M.A., 2002, Geocronologia e geoquímica isotópica dos depósitos de Cu-Au

- Igarapé Bahia e Gameleira, Província Mineral de Carajás (PA), Brasil [PhD thesis]: Universidade Federal do Pará, 214 p., <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8164>.
- Garcia, V.B.P., 2018, A raiz do sistema IOCG de Carajás: alterações hidrotermais e mineralização niquelífera neoarqueana no depósito GT-34 [Dissertação de Mestrado]: Universidade de Brasília, 80 p., <http://repositorio.unb.br/handle/10482/31948>.
- Garcia, V.B., Emilia Schutesky, M., Oliveira, C.G., Whitehouse, M.J., Huhn, S.R.B., e Augustin, C.T., 2020, The Neoproterozoic GT-34 Ni deposit, Carajás mineral Province, Brazil: An atypical IOCG-related Ni sulfide mineralization: *Ore Geology Reviews*, v. 127, p. 103773, doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103773.
- Gibbs, A.K., Wirth, K.R., Hirata, W.K., e Olszewski Jr., W.J., 1986, Age and composition of the Grão-Pará Group Volcanics, Serra dos Carajás: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, p. 201–211, <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/12001>.
- Gillespie, J., Kirkland, C.L., Kinny, P.D., Simpson, A., Glorie, S., e Rankenburg, K., 2022, Lu–Hf, Sm–Nd, and U–Pb isotopic coupling and decoupling in apatite: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 338, p. 121–135, doi:10.1016/j.gca.2022.09.038.
- Giovanardi, T., Girardi, V.A.V., Teixeira, W., e Mazzucchelli, M., 2019, Mafic dyke swarms at 1882, 535 and 200 Ma in the Carajás region, Amazonian Craton: Sr–Nd isotopy, trace element geochemistry and inferences on their origin and geological settings: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 92, p. 197–208, doi:10.1016/j.jsames.2019.02.017.
- Giustina, M.E.S. Della, Oliveira, C.G. de, Whitehouse, M., Garcia, V., e Huhn, S., 2018, Unusual Ni-sulfide deposits in the Carajás IOCG mineral system: magmatic or hydrothermal?, *in* 15th Quadrennial IAGOD International Association on the Genesis of Ore Deposits Symposium, Salta, International Association on the Genesis of Ore Deposits, p. 229–230, <http://www.iagod.org/node/27>.
- González-Álvarez, I., Pirajno, F., e Kerrich, R., 2013a, Hydrothermal nickel deposits: Secular variation and diversity: *Ore Geology Reviews*, v. 52, p. 1–3, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.11.006.
- González-Álvarez, I., Porwal, A., Beresford, S.W., McCuaig, T.C., e Maier, W.D., 2010, Hydrothermal Ni prospectivity analysis of Tasmania, Australia: *Ore Geology Reviews*, v. 38, p. 168–183, doi:10.1016/j.oregeorev.2010.04.003.
- González-Álvarez, I., Sweetapple, M., Lindley, I.D., e Kirakar, J., 2013b, Hydrothermal Ni: Doriri Creek, Papua New Guinea: *Ore Geology Reviews*, v. 52, p. 37–57, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.10.001.
- Gow, P.A., Wall, V.J., Oliver, N.H.S., e Valenta, R.K., 1994, Proterozoic iron oxide (Cu-U-

- Au-REE) deposits: further evidence of hydrothermal origins: *Geology*, v. 22, p. 633–636, doi:10.1130/0091-7613(1994)022<0633:PIOCUA>2.3.CO;2.
- Grainger, C.J., Groves, D.I., Tallarico, F.H.B.B., e Fletcher, I.R., 2008, Metallogensis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralisation: *Ore Geology Reviews*, v. 33, p. 451–489, doi:10.1016/j.oregeorev.2006.10.010.
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D., e 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, doi:10.2113/gsecongeo.105.3.641.
- Groves, D.I., Condie, K.C., Goldfarb, R.J., Hronsky, J.M.A., e Vielreicher, R.M., 2005, 100th Anniversary special paper: Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits: *Economic Geology*, v. 100, p. 203–224, doi:10.2113/gsecongeo.100.2.203.
- Groves, D.I., e Santosh, M., 2020, Craton and thick lithosphere margins: The sites of giant mineral deposits and mineral provinces: *Gondwana Research*, doi:10.1016/j.gr.2020.06.008.
- Groves, D.I., Zhang, L., e Santosh, M., 2020, Subduction, mantle metasomatism, and gold: A dynamic and genetic conjunction: *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 132, p. 1419–1426, doi:10.1130/B35379.1.
- Haddad-Martim, P.M., Carranza, E.J.M., e De Souza Filho, C.R., 2018, The fractal nature of structural controls on ore formation: The case of the Iron oxide copper-gold deposits in the Carajás mineral province, Brazilian Amazon: *Economic Geology*, v. 113, p. 1499–1524, doi:10.5382/econgeo.2018.4600.
- Haddad-Martim, P.M., Souza Filho, C.R. de, e 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*, v. 81, p. 230–244, doi:10.1016/j.oregeorev.2016.09.038.
- Hasui, Y., 2012, Cráton Amazônico: províncias Rio Branco e Tapajós, *in* Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M. de, e Bartorelli, A. orgs., *Geologia do Brasil*, São Paulo, Beca, p. 138–175.
- Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T., e Reed, M.H., 1995, Olympic dam ore genesis: a fluid-mixing model: *Economic Geology*, v. 90, p. 281–307, doi:10.2113/gsecongeo.90.2.281.
- Hayward, N., e Skirrow, R.G., 2010, Geodynamic setting and controls on iron oxide Cu-Au

- (±U) ore in the Gawler craton, South Australia, *in* Porter, T.M. org., Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective - Advances in the Understanding of IOCG Deposits, Adelaide, PGC Publishing, v. 3, p. 119–146.
- Hirata, W.K., Rigon, J.C., Kadokaru, K., Cordeiro, A.A.C., e Meireles, E.A., 1982, Geologia Regional da Província Mineral de Carajás, *in* I Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém/Pará, p. 100–110.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., e Einaudi, M.T., 1992, Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu–U–Au–REE) deposits: *Precambrian Research*, v. 58, p. 241–287, doi:10.1016/0301-9268(92)90121-4.
- Hitzman, M.W., e Valenta, R.K., 2005, Uranium in iron oxide-copper-gold (IOCG) systems: *Economic Geology*, v. 100, p. 1657–1661, doi:10.2113/gsecongeo.100.8.1657.
- Holwell, D.A., Adeyemi, Z., Ward, L.A., Smith, D.J., Graham, S.D., McDonald, I., e Smith, J.W., 2017, Low temperature alteration of magmatic Ni-Cu-PGE sulfides as a source for hydrothermal Ni and PGE ores: A quantitative approach using automated mineralogy: *Ore Geology Reviews*, v. 91, p. 718–740, doi:10.1016/j.oregeorev.2017.08.025.
- Huang, X.W., Boutroy, É., Makvandi, S., Beaudoin, G., Corriveau, L., e De Toni, A.F., 2019, Trace element composition of iron oxides from IOCG and IOA deposits: Relationship to hydrothermal alteration and deposit subtypes: *Mineralium Deposita*, v. 54, p. 525–552, doi:10.1007/s00126-018-0825-1.
- Huhn, S.R.B., Santos, A.B.S., Amaral, A.F., Ledsham, E.J., Gouveia, J.L., Martins, L.B.P., Montalvão, R.M.G., e Costa, V.G., 1988, O terreno granito greenstone da região de Rio Maria-sul do Pará, *in* Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, PA, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1438–1453.
- Hunger, R.B., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., e Gao, J.F., 2018, Hydrothermal alteration, fluid evolution, and Re-Os geochronology of the Grota Funda iron oxide copper-gold deposit, Carajás Province (Pará state), Brazil: *Economic Geology*, v. 113, p. 1769–1793, doi:10.5382/econgeo.2018.4612.
- Hunt, J.A., Baker, T., e Thorkelson, D.J., 2007, 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, doi:10.2113/gsemg.16.3-4.209.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., e Guevara, E., 2008, Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m database: <http://srtm.csi.cgiar.org> (accessed junho 2020).

- Jiang, J., e Zhu, Y., 2017, Geology and geochemistry of the Jianchaling hydrothermal nickel deposit: T–pH–fO₂–fS₂ conditions and nickel precipitation mechanism: *Ore Geology Reviews*, v. 91, p. 216–235, doi:10.1016/j.oregeorev.2017.10.005.
- Justo, A.P., Dantas, E.L., Freitas-Silva, F.H., e Rodrigues, J.B., 2018, Detrital zircon populations in the Neoproterozoic to Paleoproterozoic sedimentary coverage of Carajás, Amazon craton, Brazil, *in* Congresso Brasileiro de Geologia, 49, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia.
- Justo, A.P., Freitas-Silva, F.H., Schorscher, J.H.D., Nascimento, J.A.S., e Dantas, E.L., 2015, Derrames komatiíticos do greenstone belt a sul da serra sul, Província Mineral de Carajás, Pará, Brasil, *in* Simpósio de Geologia da Amazônia, 14, Belém, PA, Sociedade Brasileira de Geologia.
- Keays, R.R., e Jowitt, S.M., 2013, The Avebury Ni deposit, Tasmania: A case study of an unconventional nickel deposit: *Ore Geology Reviews*, v. 52, p. 4–17, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.07.001.
- Kharkongor, M.B.K., Glorie, S., Mulder, J., Kirkland, C.L., Chew, D., Kohn, B., e Simpson, A., 2023, Apatite laser ablation Lu–Hf geochronology: A new tool to date mafic rocks: *Chemical Geology*, v. 636, p. 121630, doi:10.1016/j.chemgeo.2023.121630.
- Kirkland, C.L., Fougereuse, D., Reddy, S.M., Hollis, J., e Saxey, D.W., 2018, Assessing the mechanisms of common Pb incorporation into titanite: *Chemical Geology*, v. 483, p. 558–566, doi:10.1016/j.chemgeo.2018.03.026.
- Knipping, J.L., Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Wälle, M., Heinrich, C.A., Holtz, F., e Munizaga, R., 2015, Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 171, p. 15–38, doi:10.1016/j.gca.2015.08.010.
- Krymsky, R.S., Macambira, M.J.B., Lafon, J.-M., e Estumano, G.S., 2007, Uranium-lead dating method at the Pará-Iso isotope geology laboratory, UFPA, Belém - Brazil: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 79, p. 115–128, doi:10.1590/S0001-37652007000100014.
- Krymsky, R.S., Macambira, J.B., e Macambira, M.J.B., 2002, Geocronologia U-Pb em zircão de Rochas vulcânicas da Formação Carajás, Estado do Pará, *in* Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, 2, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 48.
- Lacasse, C.M., Ganade, C.E., Mathieu, L., Teixeira, N.A., Lopes, L.B.L., e Monteiro, C.F., 2020, Restoring original composition of hydrothermally altered Archean metavolcanic

- rocks of the Carajás Mineral Province (Brazil): Geodynamic implications for the transition from lid to mobile tectonics: *Lithos*, v. 372–373, p. 105647, doi:10.1016/j.lithos.2020.105647.
- Lacerda Filho, J.V. de, Abreu Filho, W., Valente, C.R., Oliveira, C.C. de, e Albuquerque, M.C. de, 2004, Geologia e recursos minerais do estado de Mato Grosso: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil (CPRM); Secretaria de Estado de Indústria, Comércio, Minas e Energia do Estado de Mato Grosso (SICME-MT), <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/4871>.
- Lafon, J.M., Macambira, M.J.B., e 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* International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro.
- Lee, C.T.A., Luffi, P., Chin, E.J., Bouchet, R., Dasgupta, R., Morton, D.M., Le Roux, V., Yin, Q.Z., e Jin, D., 2012, Copper systematics in arc magmas and implications for crust-mantle differentiation: *Science*, v. 335, p. 64–66, doi:10.1126/science.1217313.
- Leite-Santos, P.J., e Oliveira, D.C. de, 2016, Geologia, petrografia e geoquímica das associações leucograníticas arqueanas da área de Nova Canadá: Província Carajás: *Geologia USP - Série Científica*, v. 16, p. 37, doi:10.11606//issn.2316-9095.v16i2p37-66.
- Lindenmayer, Z.G., Laux, J.H., e Teixeira, J.B.G., 2001, Considerações sobre a origem das formações ferríferas da Formação Carajás, serra dos Carajás: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31, p. 21–28, <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/10440>.
- Lisitsin, V.A., González-Álvarez, I., e Porwal, A., 2013, Regional prospectivity analysis for hydrothermal-remobilised nickel mineral systems in western Victoria, Australia: *Ore Geology Reviews*, v. 52, p. 100–112, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.04.001.
- Liu, W., Migdisov, A., e Williams-Jones, A., 2012, The stability of aqueous nickel(II) chloride complexes in hydrothermal solutions: Results of UV-Visible spectroscopic experiments: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 94, p. 276–290, doi:10.1016/j.gca.2012.04.055.
- Loukola-Ruskeeniemi, K., e Lahtinen, H., 2013, Multiphase evolution in the black-shale-hosted Ni-Cu-Zn-Co deposit at Talvivaara, Finland: *Ore Geology Reviews*, v. 52, p. 85–99, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.10.006.
- Luvizotto, G.L. et al., 2009, Rutile crystals as potential trace element and isotope mineral standards for microanalysis: *Chemical Geology*, v. 261, p. 346–369, doi:10.1016/j.chemgeo.2008.04.012.
- Macambira, J.B., 2003, O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de

- modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará [Tese de Doutorado]: Universidade Estadual de Campinas, 217 p., <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/287427>.
- Macambira, J.B., e Schrank, A., 2002, Químio-estratigrafia e evolução dos jaspilitos da Formação Carajás (PA): *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, p. 567–578, <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9854>.
- Macambira, E.M.B., Vale, A.G., Jorge João, X. da S., Andrade, J.B.F., Araújo, E.S., e Serfaty, S., 1997, Capítulo 2 - Estratigrafia, *in* Macambira, E.M.B. e Vale, A.G. orgs., São Félix do Xingu: folha SB.22-Y-B - estado do Pará, Brasília, DF, CPRM, p. 37–94, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/8718>.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., 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.
- Mansur, E.T., Dare, S.A.S., Filho, C.F.F., Miranda, A.C.R., e Monteiro, L.V.S., 2023, The distribution of trace elements in sulfides and magnetite from the Jaguar hydrothermal nickel deposit: Exploring the link with IOA and IOCG deposits within the Carajás Mineral Province, Brazil: *Ore Geology Reviews*, v. 152, p. 105256, doi:10.1016/j.oregeorev.2022.105256.
- Mansur, E.T., e 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*, v. 266–267, p. 28–43, doi:10.1016/j.lithos.2016.09.036.
- Marangoanha, B., Oliveira, D.C. de, e Dall’Agnol, R., 2019a, The Archean granulite-enderbite complex of the northern Carajás province, Amazonian craton (Brazil): Origin and implications for crustal growth and cratonization: *Lithos*, v. 350–351, p. 105275, doi:10.1016/j.lithos.2019.105275.
- Marangoanha, B., de Oliveira, D.C., Galarza, M.A., e Marques, G.T., 2020, Crustal anatexis and mantle-derived magmas forming Neoproterozoic A-type granitoids in Carajás Province, northern Brazil: Petrological evidence and tectonic control: *Precambrian Research*, v. 338, p. 105585, doi:10.1016/j.precamres.2019.105585.
- Marangoanha, B., Oliveira, D.C. de, Oliveira, V.E.S. de, Galarza, M.A., e Lamarão, C.N., 2019b, Neoproterozoic A-type granitoids from Carajás province (Brazil): New insights from geochemistry, geochronology and microstructural analysis: *Precambrian Research*, v. 324, p. 86–108, doi:10.1016/j.precamres.2019.01.010.
- Markey, R., Stein, H.J., Hannah, J.L., Zimmerman, A., Selby, D., e Creaser, R.A., 2007, Standardizing Re-Os geochronology: A new molybdenite Reference Material (Henderson,

- USA) and the stoichiometry of Os salts: *Chemical Geology*, v. 244, p. 74–87, doi:10.1016/j.chemgeo.2007.06.002.
- Marschik, R., e Fontboté, L., 2001, The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile: *Economic Geology*, v. 96, p. 1799–1826, doi:10.2113/gsecongeo.96.8.1799.
- Martins, P.L.G., Toledo, C.L.B., Silva, A.M., Chemale, F., Santos, J.O.S., e Assis, L.M., 2017, Neoproterozoic magmatism in the southeastern Amazonian Craton, Brazil: Petrography, geochemistry and tectonic significance of basalts from the Carajás Basin: *Precambrian Research*, v. 302, p. 340–357, doi:10.1016/j.precamres.2017.10.013.
- Martins, P.L.G., Toledo, C.L.B., Silva, A.M., Toledo, C., Chemale Junior, F., e Assis, L.M. de, 2018, Petrography and Chemostratigraphy of the Carajás Banded Iron Formation from N4 Deposit, Grão-Pará Group, Carajás Province., *in* Congresso Brasileiro de Geologia, 49, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 934.
- Mazoz, A. et al., 2022, Khan River and Bear Lake: Two Natural Titanite Reference Materials for High-Spatial Resolution U–Pb Microanalysis: *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 46, p. 701–733, doi:10.1111/ggr.12444.
- Meireles, E. de M., Teixeira, J.T., e Filho, C.A.M., 1982, Geologia preliminar do depósito de ouro de Serra Pelada, *in* Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 74–84.
- Meirelles, M.R., e Dardenne, M.A., 1991, Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambiente de arco arqueano, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, p. 41–50, <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11739>.
- Melekestseva, I.Y., Zaykov, V. V., Nimis, P., Tret'yakov, G.A., e Tessalina, S.G., 2013, Cu-(Ni-Co-Au)-bearing massive sulfide deposits associated with mafic-ultramafic rocks of the Main Urals Fault, South Urals: Geological structures, ore textural and mineralogical features, comparison with modern analogs: *Ore Geology Reviews*, v. 52, p. 18–36, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.03.005.
- Melo, G.H.C. de, Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., Arquaz, R.M., e Silva, M.A.D., 2019a, Evolution of the Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás Province (Brazil): Early syngenetic chalcopyrite overprinted by IOCG mineralization: *Ore Geology Reviews*, v. 111, p. 102993, doi:10.1016/j.oregeorev.2019.102993.
- Melo, G.H.C. de, Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., e Santiago, E., 2019b, 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, p. 697–718, doi:10.5382/econgeo.4659.

Melo, G.H.C. de, Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., Santiago, E.S.B., Dufrane, S.A., Aires, B., e Santos, A.F.F., 2017, Temporal evolution of the giant Salobo IOCG deposit, Carajás Province (Brazil): constraints from paragenesis of hydrothermal alteration and U-Pb geochronology: *Mineralium Deposita*, v. 52, p. 709–732, doi:10.1007/s00126-016-0693-5.

Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., de Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., de Souza Filho, C.R., e Torresi, I., 2008a, Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints: *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 129–159, doi:10.1007/s00126-006-0121-3.

Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Hitzman, M.W., Juliani, C., de Souza Filho, C.R., e Carvalho, E. de R., 2008b, 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, doi:10.1016/j.oregeorev.2008.01.003.

Monteiro, L.V.S.M., Xavier, R.P., Pestilho, A.L.S., Moreto, C.P.N., Juliani, C., Torresi, I., e Souza Filho, C.R., 2011, O cinturão sul do cobre na Província Mineral de Carajás: reconstituição do paleossistema hidrotermal associado aos depósitos de óxido de ferro–cobre–ouro, *in* Frants, J.C., Marques, J.C., e Jost, H. orgs., *Contribuições à metalogenia do Brasil*, Porto Alegre, Instituto de Geociências/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 41–70.

Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Roberto Souza Filho, C., e Moreto, C.P.N., 2014, Metalogênese da Província Carajás, *in* Silva, M. da G. da, Rocha Neto, M.B. da, Jost, H., e Kuyumjian, R.M. orgs., *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, Belo Horizonte, MG, CPRM, p. 43–92, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/19389>.

Montreuil, J.F., Corriveau, L., e Davis, W.J., 2016, Tectonomagmatic evolution of the southern great bear magmatic zone (Northwest Territories, Canada): Implications for the genesis of iron oxide-alkali-altered hydrothermal systems: *Economic Geology*, v. 111, p. 2111–2138, doi:10.2113/econgeo.111.8.2111.

Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., e Xavier, R.P., 2011a, In situ LA-ICPMS U-Pb zircon dating of the host rocks of the Sossego and Bacaba iron oxide-copper-gold deposits, *in* 11th Biennial SGA Meeting, Antofagasta, Chile.

Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Amaral, W.S., dos Santos, T.J.S., Juliani, C.,

- e de Filho, C.R.S., 2011b, 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, doi:10.1007/s00126-011-0352-9.
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Creaser, R.A., DuFrane, S.A., Melo, G.H.C., Delinardo da Silva, M.A., Tassinari, C.C.G., e 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*, v. 50, p. 517–546, doi: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., e 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*, v. 110, p. 809–835, doi:10.2113/econgeo.110.3.809.
- Motta, J.G., Souza Filho, C.R. de, Carranza, E.J.M., e Braitenberg, C., 2019, Archean crust and metallogenic zones in the Amazonian Craton sensed by satellite gravity data: *Scientific Reports*, v. 9, doi:10.1038/s41598-019-39171-9.
- Mougeot, R., Respaut, J.P., Briquieu, L., Ledru, P., Milesi, J.P., Lerouge, C., Marcoux, E., Huhn, S.B., e Macambira, M.J.B., 1996a, Isotope geochemistry constraints for Cu, Au mineralizations and evolution of the Carajás province (Pará, Brazil), *in* Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 7, p. 321–324.
- Mougeot, R., Respaut, J.P., Briquieu, L., Ledru, P., Milesi, J.P., Macambira, M.J.B., e Huhn, S.B., 1996b, Geochronological constrains for the age of the Águas Claras Formation (Carajás Province, Pará, Brazil), *in* Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 6, p. 579–581.
- Nadoll, P., Mauk, J.L., Leveille, R.A., e Koenig, A.E., 2015, Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States: *Mineralium Deposita*, v. 50, p. 493–515, doi:10.1007/s00126-014-0539-y.
- Nascimento, M. dos S., e Oliveira, D.A., 2015, Ambiente deposicional e proveniência da Formação Gorotire, Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico, *in* Gorayeb, P. e Meiguins, A. orgs., *Contribuições à Geologia da Amazônia*, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 9, p. 1–14.
- Nebel, O., Morel, M.L.A., e Vroon, P.Z., 2009, Isotope dilution determinations of Lu, Hf, Zr, Ta and W, and Hf isotope compositions of NIST SRM 610 and 612 glass wafers:

Geostandards and Geoanalytical Research, v. 33, p. 487–499, doi:10.1111/j.1751-908X.2009.00032.x.

- Nogueira, A.C.R., Truckenbrodt, W., e Pinheiro, R.V.L., 1995, Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica: Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, v. 7, p. 177–277.
- Oliveira, M.M.F. de, 2017, Caracterização e metalogênese do depósito de Ni do Jaguar, Província Mineral de Carajás [Dissertação de Mestrado]: Universidade de Brasília, 115 p., <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31175>.
- Oliveira, J.R. de, Silva Neto, C.S., e Costa, E.J.S. de, 1994, Serra Pelada, Folha SB.22-X-C: Estado do Pará. 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 Mapas Metalogenéticos e de Previsão: Brasília, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 220 p., <http://trigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/8327>.
- Oliver, N.H.S., Butera, K.M., Rubenach, M.J., Marshall, L.J., Cleverley, J.S., Mark, G., Tullemans, F., e Esser, D., 2008, The protracted hydrothermal evolution of the Mount Isa Eastern Succession: A review and tectonic implications: Precambrian Research, v. 163, p. 108–130, doi:10.1016/j.precamres.2007.08.019.
- Oliver, N.H.S., Rubenach, M.J., Fu, B., Baker, T., Blenkinsop, T.G., Cleverley, J.S., Marshall, L.J., e Ridd, P.J., 2006, Granite-related overpressure and volatile release in the mid crust: Fluidized breccias from the Cloncurry District, Australia: Geofluids, v. 6, p. 346–358, doi:10.1111/j.1468-8123.2006.00155.x.
- Olszewski, W.J., Wirth, K.R., Gibbs, A.K., e Gaudette, H.E., 1989, The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting: Precambrian Research, v. 42, p. 229–254, doi:[https://doi.org/10.1016/0301-9268\(89\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0301-9268(89)90013-2).
- Paiva Júnior, A.L. de, Lamarão, C.N., e Lima, P.H.A., 2011, Geologia, petrografia e geoquímica do batólito Seringa, Província Carajás, SSE do Pará: Revista Brasileira de Geociências, v. 41, p. 185–202, doi:10.25249/0375-7536.2011412185202.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., e Hergt, J., 2011, Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data: Journal of Analytical Atomic Spectrometry, v. 26, p. 2508–2518, doi:10.1039/c1ja10172b.
- Pereira, R.M.P., 2009, Geologia da região Sul da Serra Norte e características do minério de ferro do Depósito N8, Província Mineral Carajás: Universidade Federal de Minas Gerais, 131 p., <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-86VK8K>.

- Pestilho, A.L.S., 2011, Sistemática de isótopos estáveis aplicada à caracterização da evolução dos paleo-sistemas hidrotermais associados aos depósitos cupríferos Alvo Bacada e Alvo Castanha, Província Mineral do Carajás, PA [MSc dissertation]: Universidade Estadual de Campinas, 63 p., <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/286851>.
- Pestilho, A.L.S., e Monteiro, L.V.S., 2017, Uma revisão dos fundamentos do estudo de inclusões fluidas aquosas e de petróleo: *Terra Didática*, v. 13, p. 71, doi:10.20396/td.v13i2.8650084.
- Pestilho, A.L.S., Monteiro, L.V.S., Melo, G.H.C. de, Moreto, C.P.N., Juliani, C., Fallick, A.E., 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*, p. 103738, doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103738.
- Pimentel, M.M., Lindenmayer, Z.G., Laux, J.H., Armstrong, R., e de Araújo, J.C., 2003, Geochronology and Nd isotope 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 Sciences*, v. 15, p. 803–813, doi:10.1016/S0895-9811(02)00127-X.
- Pinheiro, R.V.L., e Holdsworth, R.E., 1997, Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil: *Journal of the Geological Society*, v. 154, p. 99–103, doi:10.1144/gsjgs.154.1.0099.
- Pinheiro, R.V.L., Kadkaru, K., Soares, A.V., Freitas, C., Ferreira, S.N., e Matos, F.M.V., 2013, Carajás, Brazil – a short tectonic review, *in* Simposio de Geologia da Amazônia, 13, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1086–1089.
- Pirajno, F., 2018, Halogens in Hydrothermal Fluids and Their Role in the Formation and Evolution of Hydrothermal Mineral Systems, *in* Harlov, D.E. e Aranovich, L. orgs., *The Role of Halogens in Terrestrial and Extraterrestrial Geochemical Processes: Surface, Crust, and Mantle*, Springer International Publishing, p. 759–804, doi:10.1007/978-3-319-61667-4_12.
- Pirajno, F., e González-Álvarez, I., 2013, A re-appraisal of the Epoch nickel sulphide deposit, Filabusi Greenstone Belt, Zimbabwe: A hydrothermal nickel mineral system? *Ore Geology Reviews*, v. 52, p. 58–65, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.11.005.
- Pollard, P.J., 2006, An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces: *Mineralium Deposita*, v. 41, p. 179–187, doi:10.1007/s00126-006-0054-x.
- Pollard, P.J., 2000, Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization, *in* Porter, T.M. org., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related*

- Deposits: A Global Perspective - Advances in the Understanding of IOCG Deposits, Adelaide, PGC Publishing, v. 1, p. 27–41.
- Pollard, P.J., Taylor, R.G., Peters, L., Matos, F., Freitas, C., Saboia, L., e Huhn, S., 2019, 40 Ar-39 Ar 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*, v. 54, p. 329–346, doi:10.1007/s00126-018-0809-1.
- Porter, T.M., 2010, Current Understanding of Iron Oxide Associated-Alkali Altered Mineralised Systems: Part I - an overview; Part II - a review, *in* Porter, T.M. org., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective - Advances in the Understanding of IOCG Deposits*, Adelaide, PGC Publishing, v. 3, p. 5–106.
- Prado, E.M.G., de Souza Filho, C.R., Carranza, E.J.M., e Motta, J.G., 2020, Modeling of Cu-Au prospectivity in the Carajás mineral province (Brazil) through machine learning: Dealing with imbalanced training data: *Ore Geology Reviews*, v. 124, p. 103611, doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103611.
- Previato, M., Monteiro, L.V.S., Bello, R.M. da S., e Gonçalves, L.C.G., 2020, Evolution of brines and CO₂-rich fluids and hydrothermal overprinting in the genesis of the Borrachudo copper deposit, Carajás Province: *Ore Geology Reviews*, v. 121, p. 103561, doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103561.
- Quadros, M.L. do E.S., e Rizzotto, G., 2007, Mapa de Recursos Minerais do Estado de Rondônia, escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Subprograma Mapas Geológicos Estaduais: Porto Velho, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - Serviço Geológico do Bras.
- del Real, I., Thompson, J.F.H., e Carriedo, J., 2018, 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, doi:10.1016/j.oregeorev.2018.08.034.
- Reis, N.J., Almeida, M.E., Riker, S.L., e Ferreira, A.L., 2006, Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas: Rio de Janeiro, CPRM, CIAMA, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/2967>.
- Réquia, K., Stein, H., Fontboté, L., e 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*, v. 38, p. 727–738, doi:10.1007/s00126-003-0364-1.
- Ribeiro da Luz, B., e Crowley, J.K., 2012, Morphological and chemical evidence of

- stromatolitic deposits in the 2.75Ga Carajás banded iron formation, Brazil: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 355–356, p. 60–72, doi:10.1016/j.epsl.2012.08.028.
- Ribeiro, B. V., Kirkland, C.L., Hartnady, M.I.H., Martin, E.L., West, E., e Polito, P., 2023, Multi-stage alteration at Nifty copper deposit resolved via accessory mineral dating and trace elements: *Precambrian Research*, v. 388, p. 107018, doi:10.1016/j.precamres.2023.107018.
- Ribeiro, B. V., Lagoeiro, L., Faleiros, F.M., Hunter, N.J.R., Queiroga, G., Ravaggi, M., Cawood, P.A., Finch, M., e Campanha, G.A.C., 2020, Strain localization and fluid-assisted deformation in apatite and its influence on trace elements and U–Pb systematics: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 545, p. 116421, doi:10.1016/j.epsl.2020.116421.
- Ricci, P.S.F., e Carvalho, M.A., 2006, Rocks of the Pium-Area, Carajás Block, Brazil – A Deep seated High-T Gabbroic Pluton (Charnokitoid-Like) with Xenoliths of Enderbitic Gneisses Dated at 3002 Ma, *in* Simpósio de Geologia da Amazônia, 9, Belém, PA, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 231–234.
- Richards, J.P., 2009, Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere: *Geology*, v. 37, p. 247–250, doi:10.1130/G25451A.1.
- Robb, L., e Hawkesworth, C., 2020, Plate Tectonics and Metallogeny, *in* Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.12535-7.
- Rodrigues, A.S.B., 2018, Estudo petrográfico, geocronológico e tipológico de zircão de rochas associadas às do grupo Grão Pará, Serra dos Carajás, Pará: Universidade Federal do Pará, 60 p., <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10588>.
- Rodrigues, D.S., 2013, Geologia, geoquímica e geocronologia do granito Boa Sorte, Município de Água Azul do Norte (PA), Província Carajás: Universidade Federal do Pará, 70 p., <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11633>.
- Rosa-Costa, L.T. da, Chaves, C.L., e Klein, E.L., 2014, Geologia e recursos minerais da folha Rio Araguari - NA.22-Y-B, Estado do Amapá, Escala 1:250.000: Belém, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/20623>.
- Rosa, W.D., 2014, Complexos acamadados da Serra da 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 de Mestrado]: Universidade de Brasília, 65 p., <https://repositorio.unb.br/handle/10482/17699>.
- Rossignol, C., Siciliano Rego, E., Narduzzi, F., Teixeira, L., Ávila, J.N., Silva, M.A.L., Lana,

- C., e Philippot, P., 2020, Stratigraphy and geochronological constraints of the Serra Sul Formation (Carajás Basin, Amazonian Craton, Brazil): *Precambrian Research*, v. 351, p. 105981, doi:10.1016/j.precamres.2020.105981.
- Salgado, S.S., de Andrade Caxito, F., Figueiredo e Silva, R.C., e Lana, C., 2019, Provenance of the Buritirama Formation reveals the Paleoproterozoic assembly of the Bacajá and Carajás blocks (Amazon Craton) and the chronocorrelation of Mn-deposits in the Transamazonian/Birimian system of northern Brazil/West Africa: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 96, p. 102364, doi:10.1016/j.jsames.2019.102364.
- 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., e Gonçalves, J.H. orgs., *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, Brasília, CPRM, p. 169–226.
- Santos, R.D. dos, Galarza, M.A., e Oliveira, D.C. de, 2013, Geologia, geoquímica e geocronologia do Diopsídio-Norito Pium, Província Carajás: *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v. 8, p. 355–382.
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Faria, M.S., Riker, S.R., Miguel, M., Almeida, M.E., e Mcnaughton, N.J., 2006, A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006, *in* Simpósio de Geologia da Amazônia, 9, Belém, PA, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 156–159.
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Gaudette, H.E., Groves, D.I., Mcnaughton, N.J., e Fletcher, I.R., 2000, A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology: *Gondwana Research*, v. 3, p. 453–488, doi:10.1016/S1342-937X(05)70755-3.
- Santos, J.O.S., Rizzotto, G.J., Potter, P.E., McNaughton, N.J., Matos, R.S., Hartmann, L.A., Chemale, F., e Quadros, M.E.S., 2008, Age and autochthonous evolution of the Sunsás Orogen in West Amazon Craton based on mapping and U–Pb geochronology: *Precambrian Research*, v. 165, p. 120–152, doi:10.1016/j.precamres.2008.06.009.
- Sardinha, A.S., Barros, C.E. de M., e 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*, v. 20, p. 327–339, doi:10.1016/j.jsames.2005.11.001.
- Satish-Kumar, M., Hermann, J., Tsunogae, T., e Osanai, Y., 2006, Carbonation of Cl-rich scapolite boudins in Skallen, East Antarctica: Evidence for changing fluid condition in the continental crust: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 24, p. 241–261,

doi:10.1111/j.1525-1314.2006.00635.x.

- Schlegel, T.U., Wagner, T., Boyce, A., e Heinrich, C.A., 2017, A magmatic source of hydrothermal sulfur for the Prominent Hill deposit and associated prospects in the Olympic iron oxide copper-gold (IOCG) province of South Australia: *Ore Geology Reviews*, v. 89, p. 1058–1090, doi:10.1016/j.oregeorev.2016.09.002.
- Schlegel, T.U., Wagner, T., e Fusswinkel, T., 2020, Fluorite as indicator mineral in iron oxide-copper-gold systems: explaining the IOCG deposit diversity: *Chemical Geology*, v. 548, p. 119674, doi:10.1016/j.chemgeo.2020.119674.
- Schlegel, T.U., Wagner, T., Wälle, M., e Heinrich, C.A., 2018, Hematite breccia-hosted iron oxide copper-gold deposits require magmatic fluid components exposed to atmospheric oxidation: Evidence from prominent hill, Gawler Craton, South Australia: *Economic Geology*, v. 113, p. 597–644, doi:10.5382/econgeo.2018.4564.
- Schmitz, M.D., Bowring, S.A., e Ireland, T.R., 2003, Evaluation of Duluth Complex anorthositic series (AS3) zircon as a U-Pb geochronological standard: New high-precision isotope dilution thermal ionization mass spectrometry results: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 67, p. 3665–3672, doi:10.1016/S0016-7037(03)00200-X.
- Schoene, B., e Bowring, S.A., 2006, U–Pb systematics of the McClure Mountain syenite: Thermochronological constraints on the age of the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ standard MMhb: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 151, p. 615–630, doi:10.1007/s00410-006-0077-4.
- Selby, D., e Creaser, R.A., 2004, Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re–Os isotopic analysis of molybdenite: Testing spatial restrictions for reliable Re–Os age determinations, and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 68, p. 3897–3908, doi:10.1016/j.gca.2004.03.022.
- Siepierski, L., 2016, Geologia, petrologia e potencial para mineralizações magmáticas dos corpos máfico-ultramáficos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás: Universidade de Brasília, 158 p., <http://repositorio.unb.br/handle/10482/21637>.
- Siepierski, L., e Ferreira Filho, C.F., 2020, Magmatic structure and petrology of the Vermelho Complex, Carajás Mineral Province, Brazil: Evidence for magmatic processes at the lower portion of a mafic-ultramafic intrusion: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 102, p. 102700, doi:10.1016/j.jsames.2020.102700.
- Siepierski, L., e Ferreira Filho, C.F., 2016, Spinifex-textured komatiites in the south border of the Carajás ridge, Selva Greenstone belt, Carajás Province, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 66, p. 41–55, doi:10.1016/j.jsames.2015.12.011.

- Sillitoe, R.H., 2003, Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 787–812, doi:10.1007/s00126-003-0379-7.
- Silva, M.A.D. da, 2018, Evolução tectono-metamórfica do embasamento mesoarqueano do Domínio Carajás, Província Carajás [Tese de doutorado]: Universidade Estadual de Campinas, 166 p., <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/350566>.
- Silva, A.C. da, 2013, Geologia, petrografia e geoquímica dos granitoides arqueanos da área de Vila Jussara, Província Carajás [Dissertação de Mestrado]: Universidade Federal do Pará, 115 p., <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11490>.
- 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 [Master dissertation]: Universidade Estadual de Campinas, 110 p., <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/286608>.
- Silva, M.A.D., Monteiro, L.V.S., Santos, T.J.S., Moreto, C.P.N., Sousa, S.D., Faustiloni, J.M., Melo, G.H.C., Xavier, R.P., e 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.
- Silva, F.F. da, Oliveira, D.C. de, Dall’Agnol, R., Silva, L.R. da, e Cunha, I.V. da, 2020, Lithological and structural controls on the emplacement of a Neoproterozoic plutonic complex in the Carajás province, southeastern Amazonian craton (Brazil): *Journal of South American Earth Sciences*, v. 102, p. 102696, doi:10.1016/j.jsames.2020.102696.
- Silva, L.R. da, Oliveira, D.C. de, e Santos, M.N.S. dos, 2018, Diversity, origin and tectonic significance of the Mesoarchean granitoids of Ourilândia do Norte, Carajás province (Brazil): *Journal of South American Earth Sciences*, v. 82, p. 33–61, doi:10.1016/j.jsames.2017.12.004.
- Silva, A.R. da C., Villas, R.N.N., Lafon, J.M., e Craveiro, G.S., 2012, Idade da alteração e mineralização do depósito de Cu-Au Visconde, Província Mineral de Carajás (Pará), Brasil, *in* Congresso Brasileiro de Geologia, 46, Santos, Sociedade Brasileira de Geologia, <http://www.sbgeo.org.br/home/pages/44>.
- Silva, A.R. da C., Villas, R.N.N., Lafon, J.-M., Craveiro, G.S., e Ferreira, V.P., 2015, Stable isotope systematics and fluid inclusion studies in the Cu–Au Visconde deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: implications for fluid source generation: *Mineralium Deposita*, v. 50, p. 547–569, doi:10.1007/s00126-014-0558-8.
- Simon, A.C., Knipping, J., Reich, M., Barra, F., Deditius, A.P., Bilenker, L., e 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, *in* Arribas R., A.M. e Mauk, J.L. orgs., *Metals, Minerals, and Society*, Society of Economic Geologists (SEG), v. 21, p. 89–114, doi:10.5382/SP.21.06.
- Simpson, A., Gilbert, S., Tamblyn, R., Hand, M., Spandler, C., Gillespie, J., Nixon, A., e Glorie, S., 2021, In-situ Lu–Hf geochronology of garnet, apatite and xenotime by LA ICP MS/MS: *Chemical Geology*, v. 577, p. 120299, doi:10.1016/j.chemgeo.2021.120299.
- Skirrow, R.G. et al., 2019, Mapping iron oxide Cu-Au (IOCG) mineral potential in Australia using a knowledge-driven mineral systems-based approach: *Ore Geology Reviews*, v. 113, p. 103011, doi:10.1016/j.oregeorev.2019.103011.
- Skirrow, R., Lyons, P., Budd, A., e Bastrakov, E., 2006, Gawler Project breaks cover; New datasets aid area selection and targeting: *AUSGEO News*, v. 83, p. 3–6.
- Skirrow, R.G., van der Wielen, S.E., Champion, D.C., Czarnota, K., e Thiel, S., 2018, Lithospheric Architecture and Mantle Metasomatism Linked to Iron Oxide Cu-Au Ore Formation: Multidisciplinary Evidence from the Olympic Dam Region, South Australia: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 19, p. 2673–2705, doi:10.1029/2018GC007561.
- Smoliar, M.I., Walker, R.J., e Morgan, J.W., 1996, Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites: *Science*, v. 271, p. 1099–1102, doi:10.1126/science.271.5252.1099.
- Soares, A.D.V., Bernardelli, A.L., Filho, C.A. de M., Bastos, J.M.E., Martins, L.P.B., e Lourenço, R.S., 1988, Geologia regional das cabeceiras do Igarapé Aquiri, extremo W da Província Mineral de Carajás, PA, *in* Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 2704–2712.
- Soares, A.D.V., Macambira, M.J.B., Santos, M.G.S. dos, Vieira, E.A.P., Masotti, F.S., Souza, C.I. de J., Padilha, J.L., e Magni, M.C.V., 2001, Depósito Cu-(Au) Cristalino, Serra dos Carajás, PA: Idade da mineralização com base em análises Pb–Pb em sulfetos (dados preliminares), *in* Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 858–861.
- Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D., e Isachsen, C.E., 2004, The ^{176}Lu decay constant determined by Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 219, p. 311–324, doi:10.1016/S0012-821X(04)00012-3.
- Souza, S.R.B., Macambira, M.J.B., e Sheller, T., 1996, Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúnas (Serra dos Carajás, PA), implicações

- estratigráficas, *in* Simpósio de Geologia da Amazônia, 5, Belém, PA, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 380–383.
- Spandler, C., Hammerli, J., Sha, P., Hilbert-Wolf, H., Hu, Y., Roberts, E., e Schmitz, M., 2016, MKED1: A new titanite standard for in situ analysis of Sm-Nd isotopes and U-Pb geochronology: *Chemical Geology*, v. 425, p. 110–126, doi:10.1016/j.chemgeo.2016.01.002.
- Stacey, J.S., e Kramers, J.D., 1975, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 26, p. 207–221, doi:10.1016/0012-821X(75)90088-6.
- Steven, N., e Armstrong, R., 2003, A metamorphosed proterozoic carbonaceous shale-hosted Co-Ni-Cu deposit at Kalumbila, Kabompo Dome: The Copperbelt ore shale in northwestern Zambia: *Economic Geology*, v. 98, p. 893–909, doi:10.2113/gsecongeo.98.5.893.
- Storey, C.D., e Smith, M.P., 2017, Metal source and tectonic setting of iron oxide-copper-gold (IOCG) deposits: Evidence from an in situ Nd isotope study of titanite from Norrbotten, Sweden: *Ore Geology Reviews*, v. 81, p. 1287–1302, doi:10.1016/j.oregeorev.2016.08.035.
- Suszczynski, E.F., 1970, La Géologie et la Tectonique de la Plateforme Amazonienne: *Geologische Rundschau*, v. 59, p. 1232–1253, doi:10.1007/BF02042291.
- Tallarico, F.H.B., 2003, O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil [PhD thesis]: Universidade Estadual de Campinas, 229 p., <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/287152>.
- Tallarico, F.H.B., Figueiredo, B.R., Groves, D.I., Kositcin, N., McNaughton, N.J., Fletcher, I.R., e 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. 100, p. 7–28, doi:10.2113/100.1.0007.
- Tallarico, F.H.B., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Figueiredo, B.R., Carvalho, J.B., Rego, J.L., e 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*, v. 39, p. 68–86, doi:10.1007/s00126-003-0383-y.
- Tassinari, C.C.G., e Macambira, M.J.B., 2004, A evolução tectônica do Craton Amazônico, *in* Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., e Brito Neves, B.B. orgs., *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de*

- Almeida, São Paulo, Beca, p. 471–486.
- Tassinari, C.C.G., e Macambira, M.J.B., 1999, Geochronological provinces of the Amazonian Craton: Episodes-News magazine of the International Union of Geological Sciences, v. 22, p. 174–182.
- Tassinari, C.C.G., Mellito, K.M., e Babinski, M., 2003, Age and origin of the Cu (Au-Mo-Ag) Salobo 3A ore deposit, Carajás Mineral Province, Amazonian Craton, northern Brazil: Episodes, v. 26, p. 2–9, doi:10.18814/epiiugs/2003/v26i1/001.
- Tavares, F.M., 2015, Evolução geotectônica do nordeste da Província Carajás [PhD thesis]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 115 p., <http://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14778>.
- Tavares, F.M., Trouw, R.A.J., da Silva, C.M.G., Justo, A.P., e Oliveira, J.K.M., 2018, 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, doi:10.1016/j.jsames.2018.08.024.
- Teixeira, N.A., e Carvalho, M.T.N., 2017, Brazil: Geological Survey under the spotlight.: Brasília, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 54 p., <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17716>.
- Teixeira, M.F.B., Dall’Agnol, R., Santos, J.O.S., Kemp, A., e Evans, N., 2019a, Petrogenesis of the Paleoproterozoic (Orosirian) A-type granites of Carajás Province, Amazon Craton, Brazil: Combined in situ Hf–O isotopes of zircon: Lithos, v. 332–333, p. 1–22, doi:10.1016/j.lithos.2019.01.024.
- Teixeira, M.F.B., Dall’Agnol, R., Schneider Santos, J.O., Carvalho de Oliveira, D., Lamarão, C.N., e McNaughton, N.J., 2018, Crystallization ages of Paleoproterozoic A-type granites of Carajás province, Amazon craton: Constraints from U–Pb geochronology of zircon and titanite: Journal of South American Earth Sciences, v. 88, p. 312–331, doi:10.1016/j.jsames.2018.08.020.
- Teixeira, A.S., Ferreira Filho, C.F., Giustina, M.E.S. Della, Araújo, S.M., e da 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: Journal of South American Earth Sciences, v. 64, p. 116–138, doi:10.1016/j.jsames.2015.09.006.
- Teixeira, W., Reis, N.J., Bettencourt, J.S., Klein, E.L., e Oliveira, D.C., 2019b, Intraplate Proterozoic Magmatism in the Amazonian Craton Reviewed: Geochronology, Crustal Tectonics and Global Barcode Matches, in Srivastava, R.K., Ernst, R.E., e Peng, P. orgs.,

- Dyke Swarms of the World: A Modern Perspective, Singapore, Springer Singapore, p. 111–154, doi:10.1007/978-981-13-1666-1_4.
- Thomson, S.N., Gehrels, G.E., Ruiz, J., e Buchwaldt, R., 2012, Routine low-damage apatite U–Pb dating using laser ablation–multicollector–ICPMS: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 13, doi:10.1029/2011GC003928.
- Tian, Y. et al., 2012, Speciation of nickel (II) chloride complexes in hydrothermal fluids: In situ XAS study: *Chemical Geology*, v. 334, p. 345–363, doi:10.1016/j.chemgeo.2012.10.010.
- Toledo, P.I. de F., Moreto, C.P.N., Xavier, R.P., Gao, J., Matos, J.H. da S.N. de, e Melo, G.H.C. de, 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: *Economic Geology*, v. 114, p. 1–34, doi:10.5382/econgeo.2019.4617.
- De Toni, A.F., 2016, Les paragenèses à magnétite des altérations associées aux systèmes à oxydes de fer et altérations en éléments alcalins, zone magmatique du grand lac de l'Ours [Dissertação de mestrado]: Université du Québec, 549 p., <http://espace.inrs.ca/id/eprint/3353/>.
- Torresi, I., Xavier, R.P., Bortholoto, D.F.A., e 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*, v. 47, p. 299–323, doi:10.1007/s00126-011-0373-4.
- Touret, J.L.R., e Huizenga, J.M., 2020, Large-scale fluid transfer between mantle and crust during supercontinent amalgamation and disruption: *Russian Geology and Geophysics*, v. 61, p. 527–542, doi:10.15372/RGG2019128.
- Touret, J.L.R., Santosh, M., e Huizenga, J.M., 2016, High-temperature granulites and supercontinents: *Geoscience Frontiers*, v. 7, p. 101–113, doi:10.1016/j.gsf.2015.09.001.
- Trendall, A.F., Basei, M.A.S., de Laeter, J.R., e Nelson, D.R., 1998, SHRIMP zircon 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, doi:10.1016/S0895-9811(98)00015-7.
- Trunfull, E.F., Hagemann, S.G., Xavier, R.P., e Moreto, C.P.N., 2020, Critical assessment of geochronological data from the Carajás Mineral Province, Brazil: Implications for metallogeny and tectonic evolution: *Ore Geology Reviews*, v. 121, p. 103556, doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103556.
- Uvarova, Y.A., Pearce, M.A., Liu, W., Cleverley, J.S., e Hough, R.M., 2018, Geochemical signatures of copper redistribution in IOCG-type mineralisation, Gawler Craton, South

- Australia: *Mineralium Deposita*, v. 53, p. 477–492, doi:10.1007/s00126-017-0749-1.
- Le Vaillant, M., Barnes, S.J., Fiorentini, M.L., Miller, J., McCuaig, T.C., e Mucilli, P., 2015, A hydrothermal Ni-As-PGE geochemical halo around the Miitel komatiite-hosted nickel sulfide deposit, Yilgarn craton, Western Australia: *Economic Geology*, v. 110, p. 505–530, doi:10.2113/econgeo.110.2.505.
- Le Vaillant, M., Saleem, A., Barnes, S.J., Fiorentini, M.L., Miller, J., Beresford, S., e Perring, C., 2016, Hydrothermal remobilisation around a deformed and remobilised komatiite-hosted Ni-Cu-(PGE) deposit, Sarah’s Find, Agnew Wiluna greenstone belt, Yilgarn Craton, Western Australia: *Mineralium Deposita*, v. 51, p. 369–388, doi:10.1007/s00126-015-0610-3.
- Valeriano, M. de M., e Rossetti, D. de F., 2012, Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data: *Applied Geography*, v. 32, p. 300–309, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004>.
- 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., e 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., Macambira, M.J.B., e Armstrong, R.A., 2008b, Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution: *Precambrian Research*, v. 161, p. 279–302, doi:10.1016/j.precamres.2007.09.001.
- Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L.T. da, Silva, C.M.G. da, e Klein, E.L., 2008c, 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>.
- Vasquez, M.L., Sousa, C.S., e Carvalho, J.M. de A. (Orgs.), 2008d, *Mapa geológico e de*

recursos minerais do estado do Pará, escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil (PGB), integração, atualização e difusão de dados da geologia do Brasil, mapas geológicos estaduais: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém.

- Veloso, Â.S.R., 2017, Evolução metalogenética do depósito de Cu-(Ni-Zn) Jatobá, Província Mineral de Carajás [Tese de Doutorado]: Universidade de São Paulo, 201 p., <https://bdpi.usp.br/item/002928145>.
- Veloso, A.S.R., Monteiro, L.V.S., e Juliani, C., 2020, The link between hydrothermal nickel mineralization and an iron oxide-copper-gold (IOCG) system: constraints based on mineral chemistry in the Jatobá deposit, Carajás Province: *Ore Geology Reviews*, p. 103555, doi:10.1016/j.oregeorev.2020.103555.
- 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.
- Wen, G., Li, J.W., Hofstra, A.H., Koenig, A.E., Lowers, H.A., e Adams, D., 2017, Hydrothermal reequilibration of igneous magnetite in altered granitic plutons and its implications for magnetite classification schemes: Insights from the Handan-Xingtai iron district, North China Craton: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 213, p. 255–270, doi:10.1016/j.gca.2017.06.043.
- Williams, P., Barton, M., Johnson, D., Fonbote, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N., e Marschik, R., 2005, Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin, *in* Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., e Richards, J.P. orgs., *Economic Geology*, p. 371–405, doi:10.5382/AV100.13.
- Williams, P., Kendrick, M., e Xavier, R., 2010, Sources of ore fluid components in IOCG deposits, *in* *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective - Advances in the Understanding of IOCG Deposits*, Adelaide, PGC Publishing, v. 3, p. 107–116.
- Wirth, K.R., Gibbs, A.K., e Olszewski Jr., W.J., 1986, 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, <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/12000>.
- Wise, S.A., e Watters, R.L., 2011, Reference Material 8599 Henderson Molybdenite: National Institute of Standards and Technology, Report of Investigation, v. 30.
- Xavier, R.P. et al., 2017, Geology and metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic copper systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil, *in* 14th SGA Biennial Meeting, Mineral Resources to Discover, Volume 3, Quebec, Society for Geology Applied to Mineral Deposits, p. 899–902.

- Xavier, R.P., Soares Monteiro, L.V., Moreto, C.P.N., Pestilho, A.L.S., Melo, G.H.C. de, Delinardo da Silva, M.A., Aires, B., Ribeiro, C., e 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.
- Xu, L., Lehmann, B., e Mao, J., 2013, Seawater contribution to polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Early Cambrian black shales of South China: Evidence from Mo isotope, PGE, trace element, and REE geochemistry: *Ore Geology Reviews*, v. 52, p. 66–84, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.06.003.
- Zambonin, W.M.M., e Tavares Jr., S.S., 2019, Caracterização tectono-estrutural do Cinturão Cauarane-Coeroeni, região central do estado de Roraima, Brasil: dados preliminares, *in* *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 16, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 317–320.