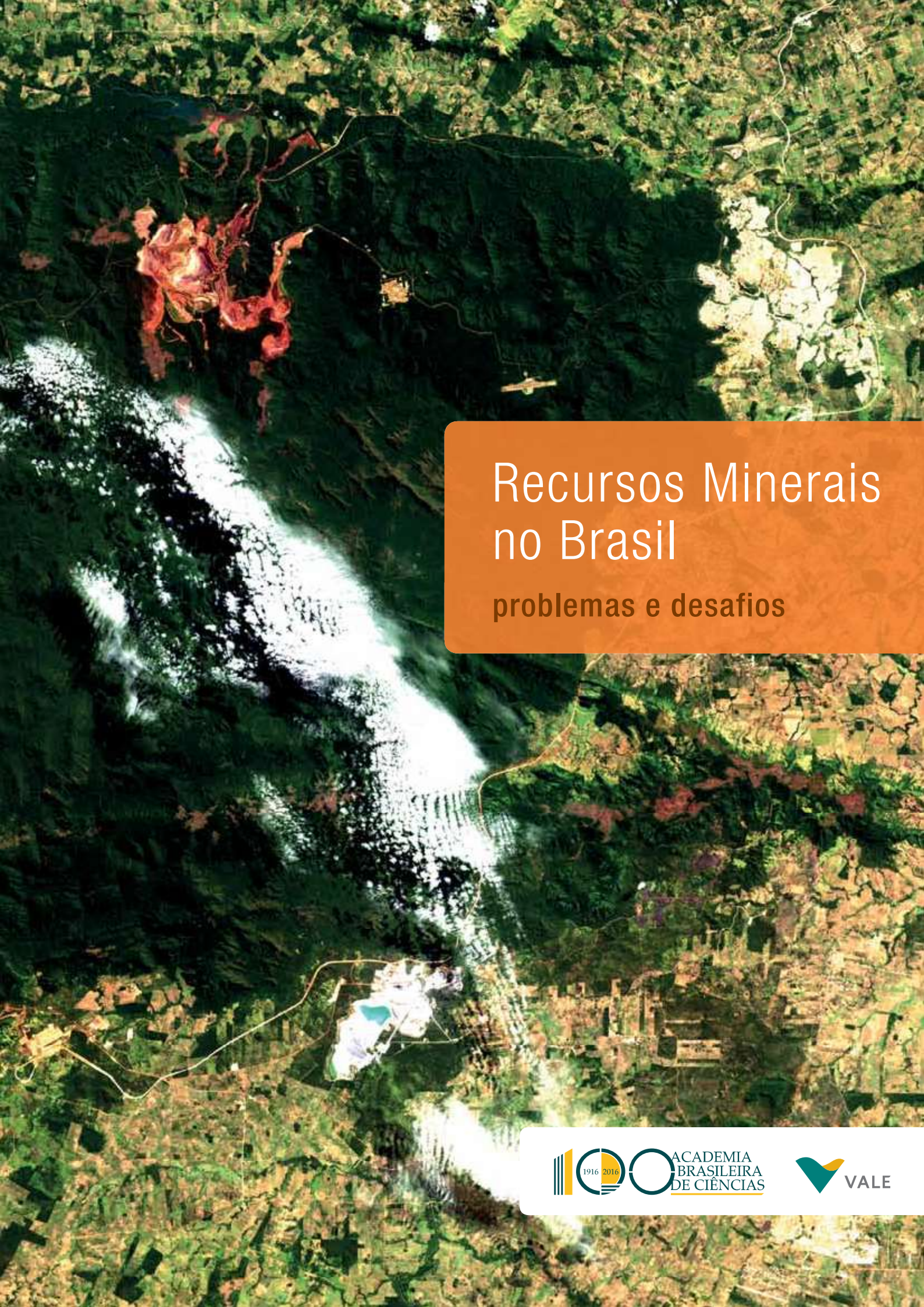




Recursos Minerais no Brasil

problemas e desafios



ACADEMIA
BRASILEIRA
DE CIÊNCIAS



VALE

Potencial mineral: cobre

Caetano Juliani

Lena V. S. Monteiro

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

Carlos Marcello Dias Fernandes

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará

RESUMO

O cobre representa uma *commodity* importante na indústria de base, sendo previsto um crescimento contínuo da sua demanda mundial nos próximos 25 anos, que poderá ser intensificado com a recuperação econômica dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. No Brasil, a demanda por cobre tem sido historicamente maior que a produção. Aproximadamente 87% das reservas lavráveis (~1,6% das reservas mundiais) são depósitos do tipo IOCG, presentes na Província Mineral de Carajás. A produção (1,5% da produção mundial) concentra-se nas minas do Sossego, Salobo, Chapada, Caraíba, Niquelândia, Fortaleza de Minas e Americano do Brasil e a autossuficiência dependerá da abertura de novas minas em Carajás e da descoberta de novas reservas. Para tanto, conceitos metalogenéticos inovativos, o desenvolvimento de novas províncias e o emprego de novas tecnologias serão necessários ao desenvolvimento do potencial metalogenético relativo a depósitos IOCG, Cu e Cu–Au do tipo pórfiro, Cu hospedado em rochas sedimentares, VHMS e outros.

Palavras-chave Cobre. Potencial mineral. Produção. Reservas. IOCG. Pórfiro. Epitermal.

INTRODUÇÃO

Apesar da queda da demanda e dos preços do cobre (Cu) nos últimos anos, notadamente em 2015, é previsto um crescimento do consumo mundial de cobre nos próximos 25 anos. Consequentemente, a produção dessa *commodity* deve vir a ser maior que toda a sua produção histórica acumulada ao longo das últimas décadas, alcançando cerca de 635 Mt de Cu contido (DOGGETT, 2014; HEITHERSAY, 2014). No Brasil, a demanda por cobre tem sido historicamente maior que a sua produção. Essa é uma das *commodities* com impacto negativo na balança comercial brasileira, representando, em 2014, 12,8% das importações de bens minerais do país (LIMA; NEVES, 2014). Ainda que exista a perspectiva de abertura de novas minas, sobretudo na Província Mineral de Carajás, para atender as demandas internas e possibilitar a autossuficiência em cobre nos próximos anos, será necessária a expansão das reservas brasileiras, a partir do desenvolvimento de depósitos já conhecidos e de novas descobertas.

Em termos globais, as mais de 100 minas de cobre com exploração iniciada nos últimos 20 anos tiveram um tempo médio da descoberta à produção de cerca de 20 anos, indicando que para manutenção do suprimento futuro de cobre ao mercado, torna-se necessário um programa contínuo de exploração mineral. Deve ainda ser considerado que os minérios têm apresentado teores decrescentes de cobre, além de aumento do seu conteúdo de arsênio, flúor e urânio, dentre outros elementos deletérios, ultrapassando a capacidade de beneficiamento das refinarias, o que tem aumentado os custos de produção da *commodity*.

No Brasil, o grande *boom* de descobertas de anomalias e/ou depósitos ocorreu na década de 1970, mas a abertura das principais minas de cobre iniciou-se apenas no início dos anos 2000. Como exemplos, podem ser citadas a Mina de Chapada, em Goiás, descoberta em 1973 pela empresa canadense INCO Ltda., com produção iniciada em 2007, e a Mina de Salobo, na Província Mineral de Carajás, descoberta em 1974. Embora esta última constitua o maior depósito de cobre já descoberto no país, sua operação somente se iniciou em 2011. Assim, para aumento da produção brasileira nas próximas décadas, é fundamental que haja um programa de desenvolvimento da exploração em províncias com depósitos conhecidos e o uso de tecnologias que possibilitem uma redução no tempo de entrada de produção, em conjunto com a exploração de novas províncias, com base em novos conceitos genéticos e exploratórios.

Para atender a demanda mundial prevista, estima-se que a produção de cobre poderá crescer até 3% ao ano, dobrando a produção atual até 2039 (DOGGETT, 2014). Considerando-se os projetos em desenvolvimento, os recursos potenciais excedem 350 Mt de cobre metálico, o que poderia suprir as demandas mundiais nas próximas décadas. Ainda assim, houve registro de queda de 20% da produção de cobre em relação à capacidade de produção teórica (ICSG, 2013) e tem havido dificuldades sociais e ambientais para implantação de minas com recursos expressivos, tais como Oyu Tolgoi, na Mongólia (HUMPHREYS, 2010) e Pebble, EUA (MUDD et al., 2013), que representa um dos maiores projetos de cobre do mundo. Adicionalmente, o adiamento, em 2012, do projeto de expansão

da mina de Olympic Dam, na Austrália, que representa o maior depósito de urânio, o quinto maior de cobre e o terceiro de ouro do mundo (HEITHERSAY, 2014), aponta para a preponderância de fatores tecnológicos, ambientais, sociais e econômicos para o sucesso dos empreendimentos (SPYKES et al., 2013). Nesse sentido, embora os recursos de cobre em depósitos já conhecidos sejam significativos, as reservas de cobre vêm diminuindo em termos globais (SPYKES et al., 2013).

Os desafios para a exploração mineral serão cada vez maiores, uma vez que os maiores depósitos, os mais próximos à superfície, os com assinaturas geofísicas mais evidentes e os com padrões claros de alteração hidrotermal foram, ou serão, encontrados primeiro. Assim, nas próximas décadas, novas ideias, novos modelos, novas províncias e diferentes tecnologias serão necessárias para que o sucesso na exploração mineral seja obtido. Adicionalmente, a exploração mineral terá como desafio o foco na descoberta de novas reservas de cobre, ou seja, depósitos de cobre economicamente viáveis, e não simples recursos (SPYKES et al., 2013). Nesse sentido, a descoberta de depósitos de classe mundial, cujo valor das reservas exceda significativamente os elevados custos da mineração e do refino por um período mínimo de cinco ou seis ciclos econômicos, tem sido o foco das companhias *majors* no país.

Contudo, parte das descobertas recentes não representam depósitos de classe mundial de interesse para as companhias *majors*. O desenvolvimento desses projetos e o aumento da produção de cobre no país poderia ser alcançado pela mineração de pequeno porte, desde que os órgãos governamentais desenvolvam políticas justas e ágeis de incentivo, que encorajem os pequenos empreendedores a implantarem projetos com visão efetiva de desenvolvimento sustentável, com planejamento que considere as diferenças de escala, em relação aos projetos da mineração de grande porte, e seus impactos tecnológicos, operacionais, ambientais e sociais.

DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS DEPÓSITOS

A maioria dos depósitos cupríferos brasileiros concentram-se na Província Mineral de Carajás (Figura 1) e apresentam semelhanças com os depósitos de óxido de ferro–cobre–ouro (*Iron oxide–Copper–Gold deposits* ou IOCG) (HITZMAN et al., 1992, 2000), tais como Salobo, Sossego, Cristalino, Igarapé Bahia/Alemão (Tabela 1) (HUHN et al., 1999; LINDENMAYER, 2003; RÉQUIA et al., 2003; TALLARICO et al., 2005; MONTEIRO et al.,

2008). Nessa província também são conhecidos outros depósitos magmáticos–hidrotermais neoarqueanos ou paleoproterozoicos, sem conteúdos elevados de magnetita ou hematita (Serra Verde, Estrela, Breves), considerados menos expressivos (NUNES et al., 2001; XAVIER et al., 2005; LINDENMAYER, 2005; BOTELHO et al., 2005).

Depósitos de cobre polimetálicos com evidências de formação por processos vulcano-exalativos, semelhantes aos depósitos de sulfeto maciço hospedados em rochas vulcânicas (*Volcanic-Hosted Massive Sulfide* ou VHMS), são também conhecidos em Carajás (depósito de Cu–Zn de Pojuca Corpo Quatro) (MEDEIRO NETO; VILLAS, 1985). Esses depósitos têm evolução complexa e registram sobreposição de eventos hidrotermais relacionados à evolução tectônica e magmática da Província Mineral de Carajás.

Depósitos VHMS também foram caracterizados em outras províncias ou distritos minerais, com destaque para Aripuanã e Cabaçal/Alto Jauru, no Mato Grosso, Bom Jardim de Goiás, Jauru e Palmeirópolis, em Goiás, e Flexal–Patos, no Pará (Figura 1) (ARAÚJO et al., 1995; LEITE et al., 2005; PINHO et al., 2010; KLEIN et al., 2014).

Depósitos de sulfetos magmáticos associados a komatiítos ocorrem em Fortaleza de Minas (MG) e Boa Vista (GO) e a intrusões máficas–ultramáficas em Americano do Brasil, Mangabal I e II e Buriti (Niquelândia), em Goiás, Poço Redondo e Porto da Folha no Complexo de Canindé (SE), Limoeiro (PE), Serrote da Lage (AL), e Vale do Rio Curaçá (Caraíba), Vale do Rio Jacurici (Várzea do Macaco) e Fazenda Mirabela (Santa Rita), na Bahia (Figura 1) (OLIVEIRA, 1990; TEIXEIRA et al., 2010b; BARNES et al., 2011; MOTA e SILVA et al., 2011, 2013, 2015; FRAGUAS, 2012; FOO et al., 2012; FERREIRA FILHO et al., 2013; GARCIA, 2013; DIAS et al., 2014). Os depósitos de Serrote da Lage e Caraíba apresentam evidências de sobreposição de processos hidrotermais epigenéticos que resultam em padrões de alteração hidrotermal e de minério semelhantes aos dos depósitos IOCG (TEIXEIRA et al., 2010b; FRAGUAS, 2012; FOO et al., 2012; GARCIA, 2013).

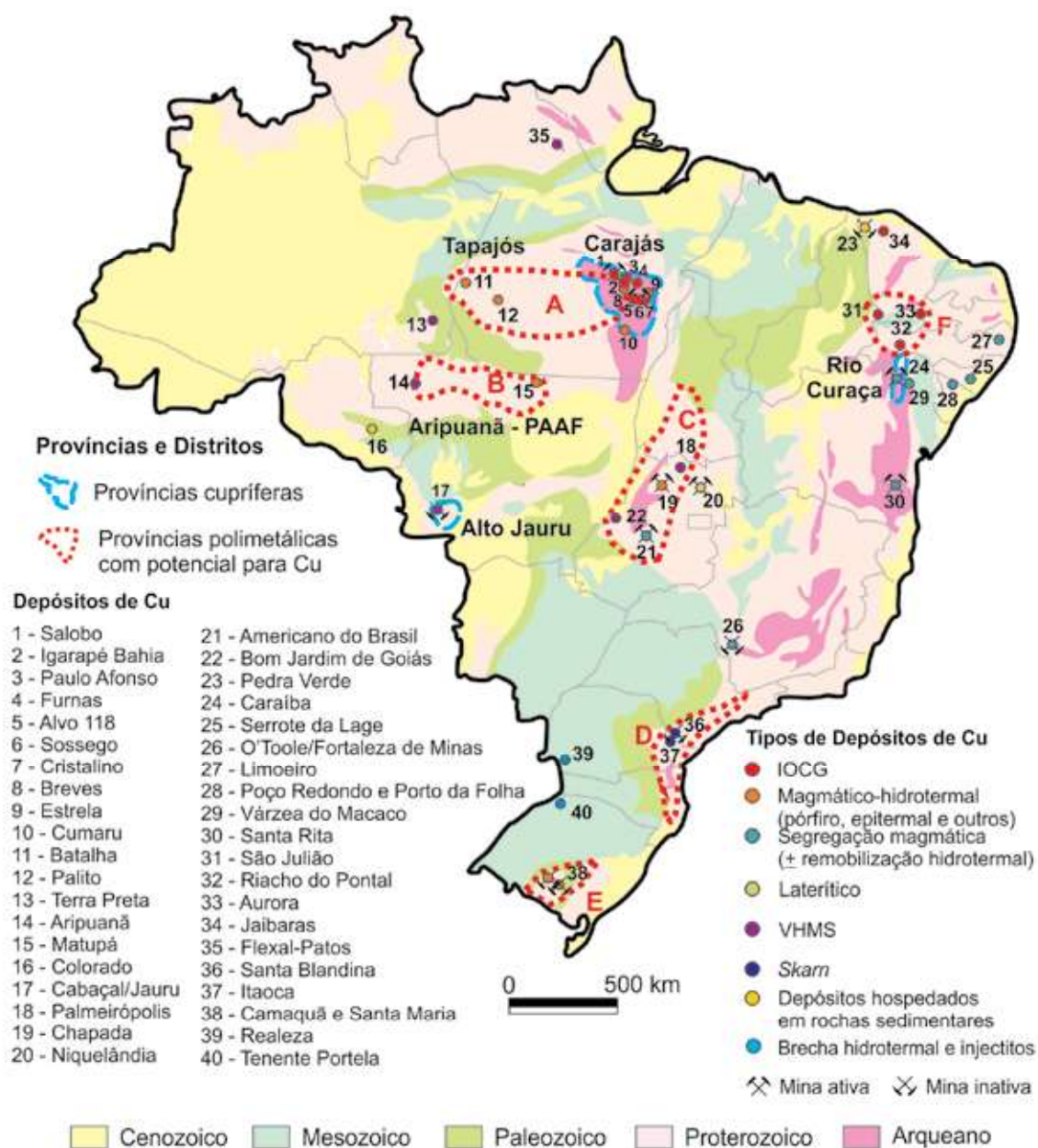


Figura 1 Mapa do Brasil mostrando a distribuição dos principais depósitos e minas de cobre do país (Fonte: DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2003; MISI et al., 2012, modificado). Áreas potenciais para ocorrência de pórfiros de Cu, de Cu-Mo e de Cu-Au do: (A) e (B) Paleoproterozoico, bem preservados, cálcio-alcalinos e alcalinos; (C) Neoproterozoico, metamorfisados; (D) Mesoproterozoico e do Neoproterozoico, metamorfisados; (E) Eopaleozoico, alcalinos; e depósitos IOCG do: (F) Neoproterozoico e Eopaleozoico.

As mineralizações das Minas do Camaquã (Caçapava do Sul e Lavras do Sul), no Rio Grande do Sul, são consideradas vinculadas a sistemas magmático-hidrotermais distais, epitermais de baixa temperatura (BETTENCOURT, 1973, 1976; REMUS et al., 1999; TONIOLO et al., 2010; BONGIOLO et al., 2011; RENAC et al., 2014) ou de origem tardi-diagenética a epigenética hidrotermal associada com a canalização de fluidos conatos aquecidos pelo vulcanismo em falhas (VEIGEL; DARDENNE, 1990). A Mina de Pedra Verde, no Ceará, seria um exemplo, segundo Matos (2012), de depósito de cobre hidrotermal hospedado em rochas (meta) sedimentares, com características que se assemelham às dos depósitos do Zambian Copper Belt, classificados como *Sedimentary Rock-Hosted Stratiform Copper Deposits* (COX et al., 2007; HITZMAN et al., 2010).

O depósito de Chapada, em Goiás, é considerado um possível depósito de cobre do tipo pórfiro, metamorfizado em fácies anfibolito (KUYUMJIAN et al., 2010). Em Itapeva, São Paulo, o depósito de Cu–Au de Santa Blandina (PARISOT et al., 1990), representa um exemplo de *skarn* com grossulária–andradita, quartzo e diopsídio em rochas carbonáticas do Grupo Açungui. Típicos skarns de W–Mo–Cu foram também descritos por Mello e Bettencourt (1998) em calcários da mesma unidade em contato com o Granito Itaóca, no Vale do Ribeira, em São Paulo e no Paraná.

Na Bacia do Paraná, ocorrências de cobre (–ouro–prata), como as de Realeza (PR) (Figura 1), são associados a brechas hidrotermais nos basaltos da Formação Serra Geral e a injectitos de areia, considerados vinculados a sistemas hidrotermais epigenéticos relacionados ao aquífero Guarani, representando novos guias prospectivos (ARENA et al., 2014).

Província Mineral de Carajás

A Província Mineral Carajás destaca-se mundialmente por apresentar a maior quantidade conhecida de importantes depósitos IOCG (Figura 2). Os depósitos IOCG de Carajás são também considerados os únicos de classe mundial de idade arqueana, formados em eventos hidrotermais em ca. 2,70 Ga e ca. 2,57 Ga (RÉQUIA et al., 2003; TASSINARI et al., 2003; TALLARICO et al., 2005; MORETO et al., 2015a, 2015b), embora alguns depósitos registrem também idades paleoproterozoicas (ca. 1,88 Ga) (TALLARICO, 2003; SILVA et al., 2005; MORETO et al., 2015a, 2015b).

Os depósitos IOCG de Carajás (Figura 3) se concentram em importantes corredores estruturais associados às zonas de cisalhamento de Cinzento ao norte (Salobo, Igarapé Bahia/Alemão, Gameleira, Pojuca, Paulo Afonso, Furnas, Pólo e Igarapé Cinzento), e de Canaã

ao sul (Sossego, Cristalino, Alvo 118, Borrachudos, Castanha, Bacaba, Bacuri, Visconde e Jatobá).

Os atributos geológicos dos depósitos IOCG de Carajás são muito variáveis (LINDENMAYER, 1990, 2003; HUH; NASCIMENTO, 1997; ALMADA; VILLAS, 1999; RÉQUIA et al., 2003; TALLARICO et al., 2005; VILLAS et al., 2005; DREHER et al., 2008; MONTEIRO et al., 2008a, 2008b; XAVIER et al., 2010, 2012; MELO et al., 2014). Esses depósitos são hospedados tanto em unidades metavulcanossedimentares neoarqueanas do Supergrupo Itacaiúnas (Figura 3), como em gnaisses e migmatitos do embasamento e apresentam relação espacial ou temporal com intrusões neoarqueanas félsicas (granitos e pórfiros) e máficas (dioritos, gabros e gabronoritos).

As extensas zonas de alteração hidrotermal sódica, sódica–cálcica, potássica e clorítica, assim como o enriquecimento em óxidos de ferro (magnetita >> hematita) são típicas. Associações minerais de alta temperatura com almandina–grunerita–biotita–magnetita caracterizam os depósitos do setor norte, enquanto os depósitos do setor sul apresentam zonas de alteração hidrotermal controladas pelo nível crustal de formação, como, por exemplo, predominância de escapolita, albita–actinolita, magnetita–apatita em depósitos formados em níveis intermediários, e de feldspato potássico e clorita nos níveis mais rasos (MONTEIRO et al., 2010).

Os corpos de minério se associam a brechas com calcopirita ou bornita–calcocita. As assinaturas isotópicas (O, H, B, Cl), assim como os estudos de inclusões fluidas, apontam para a natureza híbrida dos sistemas IOCG de Carajás, com herança de componentes mantélicos, magmáticos e externamente derivados, marinhos e meteóricos (CHIARADIA et al., 2006; DREHER et al., 2008; MONTEIRO et al., 2008a, 2008b; XAVIER et al., 2008; PESTILHO, 2011; TORRESI et al., 2012).

O ambiente geotectônico representou um fator de primeira ordem para a formação dos depósitos IOCG, que são relacionados a extensas zonas de cisalhamento E–W translitosféricas. A assinatura típica dos depósitos IOCG, enriquecidos em Cu, Ni, Co, EGP, U, LREE, P, Cl e F, pode refletir a composição de fluidos derivados da cristalização de magmas gerados a partir da fusão do manto litosférico subcontinental metassomatizado, devido à uma subdução prévia (GROVES et al., 2010) ou à interação com plumas mantélicas (TEIXEIRA et al., 2015). Múltiplos episódios de circulação de fluidos hidrotermais teriam sido responsáveis pela lixiviação, concentração e (re) mobilização de metais e outros elementos químicos. Semelhanças na evolução de fluidos nos sistemas hidrotermais arqueanos e paleoproterozo-



Figura 2 Distribuição dos depósitos de cobre mundiais e do Brasil segundo as classes minerais mais importantes. Em termos mundiais, os depósitos de Cu do tipo pórfiro relacionados a margens ativas representam os maiores recursos de cobre, enquanto no Brasil os depósitos IOCG, sobretudo os da Província Mineral de Carajás, arqueana, têm relevância econômica (Fonte: Elaborada pelos autores).

zoicos também refletem heranças de componentes a partir de mecanismos de interação fluido–rocha, incluindo zonas previamente mineralizadas.

Os depósitos cupro-auríferos da Província Carajás incluem, além dos IOCG, depósitos sem significativos conteúdos de óxidos de ferro, tais como o depósito de Cu–Au–(Mo) de Serra Verde (VILLAS; SANTOS, 2001; REIS; VILLAS, 2002; MARSCHIK et al., 2005) e os depósitos paleoproterozoicos de Cu–(Au) de Águas Claras (VILLAS; SILVA, 1998), de Cu–Au–(W–Bi–Mo–Sn) de Breves (TALLARICO et al., 2004; XAVIER et al., 2005; BOTELHO et al., 2005) e de Cu–Au–(Li–Be–Sn–W) de Estrela (LINDENMAYER et al., 2005), que apresentam padrões distintos de alteração hidrotermal, com zonas de *greisens* superpostas.

O depósito de Cu–Zn Pojuca Corpo Quatro, descoberto na década de 1970, difere dos demais por apresentar características de depósitos VHMS. É hospedado por unidades metavulcanossedimentares e apresenta mineralização primária *stratabound*, com calcopirita, pirrotita e esfalerita, e mineralização remobilizada, com pirrotita, calcopirita e molibdenita, descrita como um produto de eventos hidrotermais do tipo IOCG posteriores (SCHWARZ; FRANTZ, 2013), associados à colocação do granito anorogênico Pojuca (ca. 1,88 Ga) (MEDEIROS FILHO; VILLAS, 1985). Rochas com

antofilita–cordierita representariam o produto metamórfico de rochas de zonas de alteração hidrotermal formadas por processos exalativos singenéticos de fundo oceânico (MEDEIROS FILHO; VILLAS, 1985).

Arco Magmático de Mara Rosa

O depósito de Cu–Au–(Zn–Mo–Pb) de Chapada e os depósitos de Corpo Sul e Suruca, em Goiás, são hospedados em quartzo-feldspato-biotita, xistos associados a anfibolitos, atribuídos à sequência metavulcanossedimentar neoproterozoica do Arco Magmático de Mara Rosa. Nessa sequência se observam também intrusões de diorito e de quartzo diorito. As rochas hospedeiras e as zonas mineralizadas foram intensamente deformadas e metamorfasadas nas fácies anfibolito durante o evento colisional Brasileiro (KUYUMJIAN et al., 2010; YAMANA GOLD, 2014; OLIVEIRA et al., 2014). A alteração hidrotermal pré-metamórfica foi interpretada como formada por zonas de propilitização, biotitização, sericitização e argilitização. O modelo genético proposto para Chapada é o de um depósito de Cu–Au do tipo pórfiro metamorfasado (KUYUMJIAN et al., 2010; YAMANA GOLD, 2014; OLIVEIRA et al., 2014) e, de acordo com esse modelo, as intrusões dioríticas representariam a fonte dos fluidos magmáticos que geram o sistema hidrotermal.

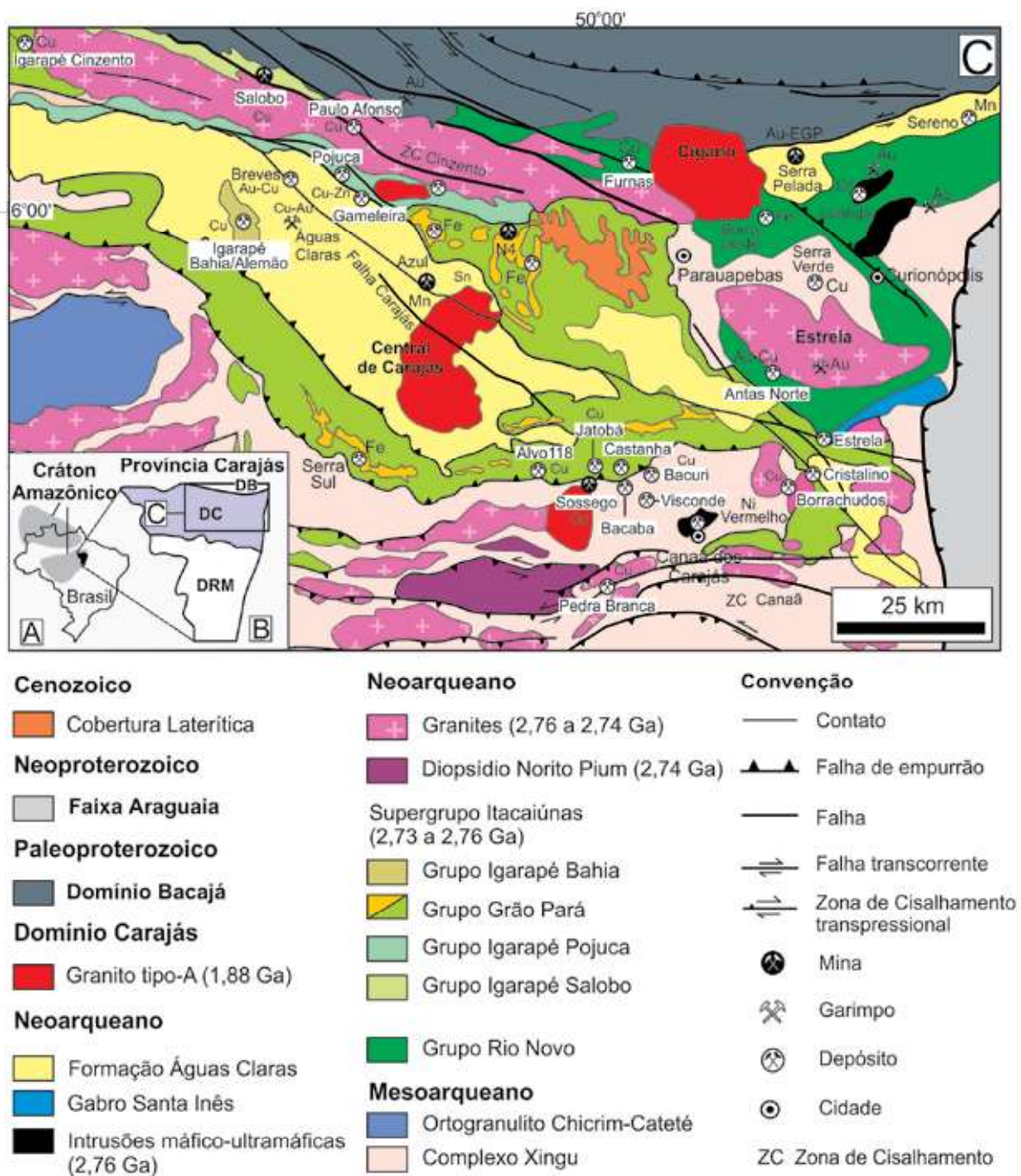


Figura 3 (A) Localização da Província Carajás no Cráton Amazônico; (B) Divisão da Província Carajás nos domínios Rio Maria (DRM) e Carajás (DC), limitado a norte pelo Domínio Bacajá (DB); (C) Mapa geológico do Domínio Carajás da Província Carajás e áreas adjacentes (VASQUEZ et al., 2008, modificado) com a localização dos depósitos minerais.

Distrito Cuprífero do Vale do Rio Curaçá

O Vale do Rio Curaçá representa o distrito cuprífero mais antigo do Brasil. Insere-se no Orógeno Itabuna–Salvador–Curaçá, que representa um cinturão orogênico paleoproterozoico localizado na borda leste do Cráton do São Francisco. De acordo com Teixeira et al. (2010a), mais de 300 intrusões máficas–ultramáficas foram identificadas nos complexos Caraíba (ortognaisses granulíticos arqueanos; ca. 2,69 a 2,63 Ga) (SILVA et al., 1997) e Tanque Novo–Ipirá (sequência metavulcanossedimentar).

Os principais corpos mineralizados (Caraíba, Alvo R22, Surubim, Vermelhos e Sussuarana) são hospedados por piroxenitos, noritos e glimeritos. Apresentam sulfetos *intercumulus* (calcopirita, bornita, covelita, cubanita, digenita, pirita, pirrotita e pentlandita) disseminados e em rede, considerados ortomagmáticos (DELGADO; SOUZA, 1975; LINDENMAYER, 1982). Contudo, também ocorre uma fase de mineralização epigenética estruturalmente controlada, constituindo veios e brechas com calcopirita e bornita na matriz, que são acompanhadas por conteúdos expressivos de magnetita, concentrações anômalas de apatita e zircão, e alteração sódica (albita–andesina) localizada, além de intenso metassomatismo potássico com formação de microclínio e flogopita (TEIXEIRA et al., 2010a; GARCIA, 2013). Esse último evento foi responsável pela formação de rochas ricas em feldspato potássico a partir de metabasitos deformados, onde zonas hidrotermalizadas com sericita, clorita, hematita e barita são também reconhecidas. Desta forma, segundo Garcia (2013), o modelo evolutivo dos depósitos do Vale do Rio Curaçá aponta para uma história multifásica, incluindo: (i) mineralização primária magmática (ca. 2,6 Ga); (ii) edificação do orógeno Itabuna–Salvador–Curaçá, com metamorfismo progressivo e granito-gênese associados (ca. 2,08 Ga); (iii) remobilização hidrotermal durante o colapso orogênico e instalação de um sistema IOCG (ca. 2,04 Ga) associado à mineralização epigenética; (iv) soerguimento do orógeno e metassomatismo tardio (ca. 1,92 Ga).

Depósito Serrote da Lage

O depósito de Serrote da Lage em Craíbas/Arapiraca (AL), descoberto em 1982 pela DOCEGEO, se associa à sequência metavulcanossedimentar do Grupo Jaramataia, constituída por gnaisses quartzosos e granada-biotita gnaisses, mármore, rochas calciossilicáticas e formações ferríferas subordinadas, e à Suíte Serrote da Lage, que representa um complexo máfico–ultramáfico proterozoico. Esse complexo, constituído por corpos de ilmenita–magnetito, ortopiroxenito e no-

rito, foi fortemente tectonizado, metamorfsado nas fácies granulito e hidrotermalizado (FOO et al., 2012). A mineralização magmática de Cu–Fe–Au ocorre disseminada nos magnetitos e nos magnetita noritos e é representada por calcopirita e bornita como fase *intercumulus*, com magnetita, hercinita e piroxênio na fase *cumulus*. Houve remobilização de calcopirita e bornita em fraturas e em brechas nas rochas metaultramáficas e metamáficas, acompanhada por alteração hidrotermal com biotita e anfibólio, considerada epigenética e comparável a de sistemas hidrotermais IOCG (FOO et al., 2012).

PRODUÇÃO E RESERVAS CONHECIDAS

As reservas brasileiras de cobre lavráveis somaram, em 2013, 11,14 Mt de Cu contido (LIMA; NEVES, 2014), representando 1,6% das reservas mundiais (690 Mt de Cu contido). Mais de 87% dessas reservas se concentram na Província Mineral de Carajás e adjacências (região de Tucumã), no Estado do Pará. As minas de Salobo e Sossego totalizam reservas de 1.491,40 Mt @ 0,9% Cu, enquanto os recursos dos demais depósitos cupríferos conhecidos na província (Igarapé Bahia–Alemão, Cristalino, Alvo 118, Furnas, Paulo Afonso, entre outros) superam 2.500 Mt @ 0,7% (Tabelas 1 e 2) (ARAÚJO, 2014).

As reservas de cobre também são encontradas em Goiás (Mina de Chapada em Alto Horizonte, Americano do Brasil, Bom Jardim de Goiás e Niquelândia), Bahia (Vale do Rio Curaçá em Curaçá e Jaguariri), Rio Grande do Sul (Caçapava do Sul e Lavras do Sul), Alagoas (Serrote da Lage em Arapiraca), São Paulo (Santa Blandina em Itapeva), Minas Gerais (Fortaleza de Minas) e Mato Grosso (Aripuanã e Rio Branco), como apresentado na Tabela 1.

Em 2014, a produção de cobre se concentrou em poucas minas operadas pelas companhias VALE (Sossego, PA), Salobo Metais (Salobo, PA), Mineração Maracá (Chapada, GO), Mineração Caraíba (Pilar–Surubim, BA), Votorantim Metais Níquel (Niquelândia, GO e Fortaleza de Minas, MG) e a Prometalica Mineração Centro-Oeste (Americano do Brasil, GO) (IBRAM, 2012; DNPM, 2014; LIMA; NEVES, 2014). A produção de cobre no país totalizou 210.700 t de concentrado de Cu em 2012 (1,3% da produção mundial) e 261.950 t em 2013 (1,5% da produção de cobre mundial).

As minas de cobre Sossego e Salobo foram as primeiras da Província Mineral de Carajás a entrarem em produção, respectivamente em 2004 e 2011, e respondem por uma parte significativa da produção

de cobre do país (Tabela 1). A mina de Sossego, em Canaã dos Carajás (PA), apresenta produção estável de 140 mil t/ano de Cu contido de concentrado, com previsão de vida útil até 2024. A mina de Salobo iniciou as operações na Fase I, em 2011, com capacidade de produção anual de 100.000 t de Cu e deve concluir a integração com a Fase II, em 2015, alcançando o dobro de sua capacidade de produção (ARAÚJO, 2014), com vida útil de 50 anos. Devido ao aumento de produção da mina de Salobo, em Carajás, a produção de cobre brasileira medida pelo Índice de Produção Mineral (IPM), em 2014, apresentou crescimento de 15,1% em relação à produção de 2013 (DNPM, 2014; LIMA; NEVES, 2014), representando 5,08% do valor total de produção mineral brasileira.

Outros projetos da VALE em Carajás poderão resultar em aumento da produção de cobre nos próximos anos, dependendo de fatores econômicos e ambientais, tais como: Alvo 118 com mineração e refino de cobre por SXEW, objetivando produção de 38 mil t/ano de cátodo de cobre; Alemão, com estimativa de 80.000 t/ano de Cu contido em concentrado; e Cristalino, com produção de 100.000 t/ano de Cu contido em concentrado (Tabela 2). Esse último, localizado a 45 km a leste da Mina de Sossego, poderá alimentar a planta de processamento dessa mina, com vida útil prevista até 2024 (ARAÚJO, 2014), assim como corpos satélites dessa mina (Bacaba, Visconde, Bacuri, Jatobá, Castanha).

Tabela 1 Principais minas de cobre do Brasil com dados relativos a reservas iniciais, teores e produção (TPa).

Depósito (Empresa)	Descoberta	Período de exploração	Tipologia	Atributos Geológicos	Reservas/ e teores	Produção de Concentrado
Salobo, PA (VALE)	1974	2011 – Atual	IOCG (1) (2) (3)	Minério com cc–bn–mag associado a rochas com mag–alm–gru–bt–tur (1)	1.136,4 Mt @ 0,71% Cu e 0,4 g/t Au (4)	Cu: 200.000 (Fase I-II) (*) Au: 5; Ag: 500
Sossego, PA (VALE)	1997	2004 – Atual	IOCG (5)	Brechas com ccp–py–mag e zonas com alteração Na e Na–Ca (Sequeirinho) e K e chl (Sossego) (5)	355 Mt @ 1,1 % Cu e 0,28 g/t Au (6)	Cu: 140.000
Chapada, GO (Yamana)	1973	2007 – Atual	Cu–pórfiro (7) (8)	Disseminações de ccp–py–mag–(bn–mo–sp–gn) em gnaisses e xistos cortados por intrusões dioríticas (7)	479,843 Mt @ 0,25 g/t de Au e 0,29 % de Cu (8)	Cu: 65.000
Caraíba, BA (Mineração Caraíba)	1874	1982 – Atual	Segregação magmática/ IOCG (9)(10)	Ccp–bn disseminada em piroxenitos (intrusão máfica–ultramáfica) e ccp–bn em brechas com alteração hidrotermal (Fe–K) associada (9)	Pilar: 24,64 Mt @ 1,8 % Cu; Surubim: 8,72 Mt @ 0,88% Cu; Vermelhos: 51,41 Mt @ 0,91 % Cu	Cu: 28.000
Americano do Brasil, GO (Prometalica)	1969	2006 – Atual	Segregação magmática (11)	Sulfetos (po, py, ccp, pn) maciços e disseminados e em rede em intrusão máfica–ultramáfica	3,1 Mt @ 1,12 % Ni e 1,02 % Cu (11)	Cu: 8.500 Ni: 6.000

Depósito (Empresa)	Descoberta	Período de exploração	Tipologia	Atributos Geológicos	Reservas/ e teores	Produção de Concentrado
Buriti, GO (Votorantim Metais)	1908	1979 – Atual	Níquel laterítico (12)	Minério saprolítico silicatado (gar e Ni-sme) e oxidado (gt), com Cu–Co, formado a partir de dunitos e piroxenitos (12)	53 Mt @ 1,45 % Ni; 0,172% Co; 0,05% Cu (13)	Cu: 1.200; Co: 1.700; Ni: 20.000
Santa Rita, BA (Mirabela Mineração)	1985	2010 – Atual	Segregação magmática (14)	Nível estratiforme com sulfetos disseminados (Ni–Cu–PGE) em sequência cumulática em intrusão acamadada (14)	121 Mt @ 0,60 % Ni, 0,16 % Cu, 0,016 % Co e 91 ppb Pt (14)	Ni: 150.000
O'Toole, Fortaleza de Minas, MG	1983	1997 – 2013	Segregação magmática/ Remobilização hidrotermal (15) (16)	Sulfetos (po, pn, ccp, mag, EGP) maciços brechoides e disseminados em komatiitos e vênulas e veios tardios (15) (15)	10 Mt @ 2,5% Ni, 0,4% Cu, 500 ppm Co, 0,7 g/t Pt, Pd e Au (17)	Ni–Cu–Co: 150.000
Cabaçal, MT	1879	1987 – 1991	VHMS/Remobilização em zona de cisalhamento (18)	Sulfetos (py, po, gn, sp, ccp, Au, Bi) maciços, venulares e brechados em vulcânicas félsicas e tufitos com ser, chl, silicificação (18)	869.279 t @ 0,82% Cu e 5 g/t Au (18)	
Santa Blandina, SP	1941	1945 – 2004	Skarn de Cu–Au (19)	Filões com py, ccp e bn em escarnito (grs–adr, di) no contato entre granito e rochas carbonáticas (19)	576.844 t @ 2,62% Cu	Cu: 640
Camaquã (Uruguai e São Luiz)	1865	1875 – 1996 com interrupções	Epitermal distal (20) (21)	Sulfetos (cc–bn, py, ccp, qtz, hem, brt) disseminados/ filões em rochas siliciclásticas da Bacia do Camaquã (20)	22,53 Mt @ 0,76% Cu (1901–1996) (21)	3,5 Mt de minério com 44.000 t de Cu (até 1996)
Pedra Verde, CE	1833	1960 – 1994 com interrupções	Depósito em rochas sedimentares	Sulfetos (mrc, py, ccp, bn, cc, Ag) disseminados em filito com cal–chl, ser, hem e silicificação (22)	44,23 Mt @ 0,9% Cu	Sem informação

(*) Previsão; TPa = toneladas por ano; (1) LINDENMAYER (2003), (2) RÉQUIA et al. (2003), (3) MELO (2014), (4) ARAÚJO (2014), (5) MONTEIRO et al. (2008), (6) LANCASTER et al. (2000), (7) KUYUMJIAN et al. (2010), (8) YAMANA GOLD (2014), (9) TEIXEIRA et al. (2010a), (10) GARCIA (2013), (11) MOTA-e-SILVA (2011), (12) OLIVEIRA (1990), (13) VOTORANTIM METAIS (2015), (14) BARNES et al. (2011), (15) BRENNER et al. (1990), (16) CARVALHO; BRENNER (2010), (17) BRENNER (2007), (18) PINHO et al. (2010), (19) PARISOT et al. (1990), (20) BETTENCOURT (1976), (21) TONIOLO et al. (2010), (22) MATOS (2012). Abreviações: adr = andradita; alm = almandina; Bi = bismuto nativo; bn = bornita; brt = barita; bt = biotita; cal = calcita; cc = calcocita; ccp = calcopirita; chl = clorita; di = diopsídio; gar = garnierita; gn = galena; grs = grossulária; gru = grunerita; gt = goethita; hem = hematita; mag = magnetita; mo = molibdenita; mrc = marcassita; Ni-sme = esmectita níquelífera; pn = pentlandita; py = pirita; po = pirrotita; sp = esfalerita; qtz = quartzo; ser = sericita; tur = turmalina; Na = zona de alteração hidrotermal sódica; Na–Ca = alteração sódico-cálcica; K = alteração potássica; Fe–K = alteração ferro-potássica.

No Vale do Curaçá, na Bahia, a mina subterrânea de Pilar (Mineração Caraíba), em Jaguarari, foi responsável por até 80% da produção de minério e de concentrado de cobre até o começo dos anos 2000, antes do início da exploração na Mina do Sossego, em Carajás. Produz, anualmente, mais de 852.383 t de minério de cobre, enquanto a Mina de Surubim (Mineração Caraíba), em Curaçá, extrai 1.243.690 t de minério de cobre em mina a céu aberto. A Mina de Vermelhos, em Juazeiro (BA), tem capacidade de produção de 30.000 t/ano de Cu contido de concentrado, com início de produção em 2016. A Mina de Chapada (Mineração Maracá – Yamana Gold), em Alto Horizonte (GO), opera desde 2007 com capacidade de 65.000 t/ano de Cu contido de concentrado, com planejamento operacional inicial até 2019 (YAMANA GOLD, 2014, 2015). O início da operação dessa mina, assim como as de Sossego e Salobo, permitiu que a produção de cobre no país alcançasse um novo patamar.

Em relação aos projetos futuros, na Província Mineral de Carajás e adjacências, os depósitos de Pedra Branca (16,74 Mt @ 2,29% Cu e 0,66 ppm Au), Antas

Norte (6,38 Mt @ 2,38% Cu e 0,50 ppm de Au) e Antas Sul (10,08 Mt @ 0,82% Cu e 0,2 ppm de Au) (MOTTRAM, 2014) estão em desenvolvimento pela Avanco Resources Limited. Esses apresentam alteração hidrotermal semelhante a dos depósitos IOCG. Com decreto de lavra obtido em 2015, há previsão de produção anual de 12.000 t de concentrado de cobre e de 217 kg de Au na Mina Antas Norte.

Em Tucumã (PA), encontra-se o depósito de Boa Esperança, localizado a aproximadamente 180 km a sudoeste de Carajás. Foi descoberto em 2003 pela Codelco do Brasil Mineração Ltda, que transferiu os direitos minerários para a Mineração Caraíba em 2007. O depósito representa um corpo de brecha mineralizado em Cu–Co–Mo associado a intensa alteração hidrotermal potássica, clorítica e carbonática (HENRIQUE et al., 2013) e é considerado uma variante dos depósitos do tipo IOCG sem ouro. Os recursos são estimados em 66,5 Mt com teores médios de 0,72% Cu, com previsão de entrada em operação para 2016, com produção de 30.000 t/ano de concentrado de Cu.

Tabela 2 Principais depósitos de cobre do Brasil com dados relativos a recursos, teores e capacidade de produção de concentrado prevista (TPa).

Depósito (Empresa)	Descoberta	Período de exploração	Tipologia	Atributos Geológicos	Recursos/ e teores	Produção
Cristalino, PA (VALE)	1884	2016 (*)	IOCG (1)	Brechas com ccp–py–mag em rochas metavulcânicas máficas e félsicas com alteração Na, K, chl (1)	482 Mt @ 0,65% Cu e 0,06 g/t Au (2)	Cu: 100.000
Alvo 118, PA (VALE)	1997	2016 (*)	IOCG	Brechas com ccp–py–hem associadas à alteração K e chl (3)(4)	170 Mt @ 1,0% Cu e 0,3 g/t Au (5)	Oxidado: 38.000 (*)
Antas Norte e Sul, PA (Avanco)	2011	2015 (*)	Variante dos IOCG (6)	Brechas com ccp e alteração hidrotermal (act, bt), próximo ao granito Estrela e gabro	6,38 Mt @ 2,38% de Cu; 10,08 Mt @ 0,82% de Cu (6)	Cu: 12.000 Au: 217 kg/ano
Boa Esperança, PA (Mineração Caraíba)	2003	2016 (*)	Variante dos IOCG	Brecha mineralizada em Cu–Co–Mo. Intensa alteração hidrotermal (K, chl e cal) (7).	66,5 Mt @ 0,72% Cu (7)	Cu: 30.000
Aripuanã, MT (Votorantim Metais)	1980	2018 (*)	VHMS + metamorfismo de contato e cisalhamento (8)	Stringer com sp, po, gn, py e ccp e sulfetos maciços, bandados, e disseminados em vulcânicas bimodais com chl, cal, bt, tr (8)	34 Mt@ 4,27% Zn, 1,50% Pb, 0,29% Cu, 0,30 g/t Au and 37,39g/t Ag (9)	Cu: 4.000 Zn: 65.000 Pb: 25.000
Serrote da Lage, AL (Vale Verde/ Aura Minerals)	1982	2016 (*)	Segregação magmática/ IOCG (10)	Ccp–bn–py–po <i>intercumulus</i> em noritos em intrusão máfica–ultramáfica metamorfisada e remobilização de ccp–bn em fraturas e brechas	170 Mt @ 0,51% Cu, 0,09 g/t Au, 14,8 % Fe (10)	Cu: 40.000

Depósito (Empresa)	Descoberta	Período de exploração	Tipologia	Atributos Geológicos	Recursos/ e teores	Produção
Igarapé Bahia/ Alemão, PA (VALE)	1974/1996	Au: 1992 – 2002	Au laterítico e IOCG (11)	Brecha com ccp–mag–bn–mo–co em rochas vulcanossedimentares com intensa cloritização	219 Mt @ 1,4% Cu e 0,86 g/t Au (11)	Au: 60 t (1992–2002) Cu: 80.000
Furnas, PA (VALE)	1978		IOCG	Brechas com ccp–bn associadas a rochas com mag–alm–gru	500 Mt @ 0,7 % Cu	Sem informação
Gameleira, PA (VALE)	1970		IOCG	Veios e brechas com ccp–bn em rochas com am–pl–qtz, bt–qtz–alm e mag–qtz–gru (12)	100 Mt @ 0,7% Cu (12)	Sem informação
Pojuca, PA (VALE)	1970		VHMS (13)	Mineralização <i>stratabound</i> (ccp, py, po, sp) em rochas vulcanossedimentares	58 Mt @ 0,87% de Cu e 0,90% de Zn (13)	Sem informação
Breves, PA (VALE)	1998		Depósito polimetálico de Cu–Au–(Ag–W–Bi–Mo–Sn) (14)	Minério disseminado/ <i>stockwork</i> (ccp, apy, py, mo, po, wo, cst, bis) em zona apical de granito tipo A intrusivo em rochas sedimentares	50 Mt @ 1,22% Cu, 0,75 g/t Au, 2,4 g/t Ag, 1200 g/t W, 175 g/t Mo, 75 g/t Bi, 70 g/t Sn (14)	Sem informação
Estrela, PA (VALE)	1980		Depósito polimetálico de Cu–Au–(Li–Be–Sn–W) (15)	Veios/ brechas com ccp, Co–py, Ni–po, mo e bn em metandesitos e gabros com alteração K e <i>greisens</i> , próximo à cúpula de granito do tipo A	230 Mt @ 0,5% Cu (15)	Sem informação
Pedra Branca, PA (AVANCO)	2003		IOCG (6)	Corpos tabulares com ccp–py–po hospedados por granito cisalhado, intrusivo em gnaisses, e diorito (6)	16,74 Mt com 2,29% de Cu e 0,66 Au (6)	Sem informação
Limoeiro, PE (Votorantim Metais)	2009		Segregação magmática (16)	Po–ccp–pn disseminados no topo de uma intrusão ultramáfica tubular conolítica (16)	35 Mt @ 0,25 Ni, 0,27% Cu, 0,4 ppm Pd, 0,15 Pt (16)(17)	Sem informação
Palmeirópolis, GO	1974		VHMS	Sulfetos (po, py, sp, ccp, gn) maciços e disseminados em anfibolitos (com alm–bt, ath–bt) (18)	4 Mt @ 1,23% Cu; 4,64% Zn; 0,72% Pb; 25,1 g/t Ag (18)	Sem informação
Bom Jardim de Goiás, GO	1974		VHMS (19)	<i>Stockwork</i> com ccp e py com silicificação associada, hospedado por sequência vulcanossedimentar	4,57 Mt @ 0,92% Cu (19)	Sem informação

(*) Previsão; (1) HUHNS et al. (1999), (2) NCL BRASIL (2005), (3) TALLARICO (2003), (4) TORRESI et al. (2012), (5) RIGON et al. (2000), (6) MOTTRAM (2014), (7) HENRIQUE et al. (2013), (8) LEITE et al. (2005), (9) VOTORANTIM METAIS (2015), (10) FOO et al. (2012), (11) TALLARICO et al. (2005), (12) CORDEIRO (1999), (13) MEDEIROS NETO; VILLAS (1985), (14) NUNES et al. (2001), (15) LINDENMAYER et al. (2005), (16) (17) MOTA-E-SILVA et al. (2013, 2015), (18) ARAÚJO et al. (1995), (19) OLIVEIRA (2000). Abreviações: act = actinolita; alm = almandina; am = anfibólio; apy = arsenopirita; ath = antofilita; bis = bismutinita; bn = bornita; bt = biotita; cal = calcita; ccp = calcopirita; chl = clorita; co = cobaltita; Co–py = pirita cobaltífera; cst = cassiterita; gn = galena; gru = grunerita; hem = hematita; mag = magnetita; mo = molibdenita; pl = plagioclásio; pn = pentlandita; py = pirita; po = pirrotita; sp = esfalerita; qtz = quartzo; tr = tremolita; wo = wolframita; Na = zona de alteração hidrotermal sódica; Na–Ca = alteração sódico-cálcica; K = alteração potássica.

IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E ESTRATÉGICA PARA O PAÍS

O cobre representa uma *commodity* com uso importante na indústria de base, incluindo construção civil (condutores elétricos de baixa tensão para instalações prediais, tubos e conexões para água quente e gás, laminados), setor automobilístico, telecomunicações (cabos de pares metálicos), eletrodomésticos da linha branca e energia. Seu uso é intensificado com investimentos em obras de infraestrutura, notadamente em redes de transmissão e distribuição de energia e, usualmente, seu consumo reflete o aumento da atividade econômica dos países desenvolvidos.

No segundo semestre de 2014, as vendas de minério de cobre foram responsáveis por 6,3% das receitas da CFEM. Esse valor é o segundo maior em arrecadação por *commodity*, que é fortemente concentrada no ferro, e totalizou 72,4% e 58,3% da receita da CFEM em 2013 e 2014, respectivamente. Com a queda do preço do minério de ferro, a participação do cobre nas exportações brasileira aumentou em 2014, representando 6,1% das exportações de bens minerais (LIMA; NEVES, 2014). No entanto, o cobre ainda representa uma das principais *commodities* importadas pelo país, representando, em 2014, 12,8% das importações (exceto os hidrocarbonetos), atrás apenas do potássio (42,3%) e do carvão (31,5%). O Chile é o principal país de origem das importações brasileiras, totalizando 13,7%. As importações desse minério aumentaram em US\$ 91,8 milhões, 27,2% em variação, entre o último semestre de 2013 e o de 2014 (LIMA; NEVES, 2014). No ano de 2013, o Brasil importou 507.641 t de bens primários de minério e/ou concentrado de cobre, equivalentes a 152.292 t em metal contido, a um custo de US\$ FOB 1,06 bilhão (DNPM, 2014). A expectativa é que, com a segunda etapa da mina de Salobo (PA) entrando em produção, o Brasil poderá ser autossuficiente em Cu (MARINI, 2015).

Historicamente, os custos da produção nacional de cobre têm sido elevados, superiores aos do cobre importado estabelecidos pelo LME (*London Metal Exchange*), em parte devido aos elevados custos operacionais de Carajás, que dominou a produção de cobre no país até o início dos anos 2000 (TILTON, 2015). No entanto, a abertura de novas minas (Sossego - 2004; Americano do Brasil - 2006; Chapada - 2007; Salobo - 2011) e a modernização das instalações de Carajás, com significativos investimentos em tecnologia, possibilitaram a diminuição dos custos operacionais e uma mudança significativa no minero-negócio de cobre no país.

O cenário atual representa um avanço em relação ao início do desenvolvimento dos projetos de cobre no país, caracterizado pelo extenso tempo de maturação devido à pouca experiência nacional com mineração de cobre; dependência de *know-how* e experiência relativa aos grandes depósitos de cobre nos Andes com tipos de mineralizações e depósitos distintos; dificuldades na caracterização tecnológica dos minérios e no emprego de tecnologias de beneficiamento de minérios oxidados e sulfetados; e dificuldades para o licenciamento ambiental em função das dimensões dos projetos, da legislação vigente, sua localização e da necessidade de grandes áreas para as bacias de rejeito. Parte dessas dificuldades ainda trazem impactos negativos ao desenvolvimento de novos projetos.

PERSPECTIVAS DE AUMENTO DE RESERVAS

A descoberta de novos depósitos que possam aumentar as reservas de cobre deverá considerar novos modelos genéticos e o desenvolvimento de novas províncias metalogenéticas. A classe dos depósitos IOCG, devido à sua importância econômica na Província Mineral de Carajás, representa um importante alvo de pesquisa mineral em diferentes regiões do país. Entre as áreas com projetos em desenvolvimento podem ser citadas as de São Félix do Xingu (Projeto Liberdade), Província Borborema (MAAS et al., 2003; MACHADO, 2006; HUHN et al., 2011, 2014) e o Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá (Vale do Rio Curaçá e Bloco Gavião na Chapada Diamantina Ocidental) (GARCIA, 2013; CAMPOS, 2013).

Mudanças recentes nos paradigmas relativos aos depósitos cupríferos do Vale do Rio Curaçá apontam para a importância de processos metassomáticos epigenéticos associados a zonas de cisalhamento e circulação de fluidos hidrotermais em larga escala para a gênese desses depósitos que, a exemplo do depósito Carajás, podem registrar a sobreposição de processos magmáticos e hidrotermais associados a sistemas IOCG (FRAGUAS, 2012; GARCIA, 2013). Essas novas evidências geológicas são importantes na conceituação de novos modelos exploratórios, ampliando, assim, o potencial metalogenético da região.

De acordo com Huhn et al. (2014), essa mudança de perspectiva, ao estabelecer os vínculos dos depósitos IOCG com importantes zonas de cisalhamento, possibilitou a reavaliação de áreas conhecidas na Província Borborema desde a década de 1930 e a retomada de trabalhos sistemáticos de exploração mineral pela

INCO Brasil, nos anos 2000, e pela VALE, em 2005. Assim, a potencialidade de ocorrência de depósitos do tipo IOCG no contexto da Província Borborema tem sido tema de estudos recentes, como os de Maas et al. (2003), Machado (2006) e Lisboa et al. (2009) na Faixa/Terreno Orós–Jaguaribe e na região limitada pelas cidades de Mandacaru, São Julião, Fronteiras e Pio IX (PI), além de Campos Sales (CE), bem como as pesquisas de Huhn et al. (2011) no Projeto Aurora, na região do Cariri (CE), e de Huhn et al. (2014) na região de Riacho do Pontal (BA). Parte das ocorrências cupríferas se associam a bacias pós-orogênicas ediacaranas ou cambro-ordovicianas instaladas sobre expressivos lineamentos, como, por exemplo, a Bacia de Jaibaras no Lineamento Transbrasileiro (PARENTE et al., 2011), a Bacia de Aurora no Lineamento Patos (PARENTE; ARTHAUD, 2004) e a Bacia de Carnaubinha (LISBOA et al., 2009).

Nessas áreas, os depósitos de cobre estão comumente em brechas hidrotermais quartzo–hematíticas associadas a importantes zonas de cisalhamento e com alteração hidrotermal expressiva (cloritização, albitização, alteração potássica com feldspato potássico, silicificação, sericitização, hematitização e sulfetização tardia com calcopirita, calcocita, pirita e bornita) (HUHN et al., 2011, 2014). Esses estudos, de fato, expandem o potencial para ocorrência de depósitos IOCG em terrenos e zonas de cisalhamento de idade brasileira ou eopaleozoicas, assim como evidenciam a relevância de importantes descontinuidades trans-crustais, como o contato entre a Província Borborema e o Cráton do São Francisco (HUHN et al., 2014).

Embora os depósitos de cobre conhecidos no Brasil sejam predominantemente do tipo IOCG, também ocorrem depósitos do tipo pórfiro metamorfisados, como o da Chapada (GO), o que configura um modelo exploratório adicional para antigos arcos magmáticos nos cinturões paleo- a neoproterozoicos no Brasil. Entretanto, a exploração desses terrenos tem exigido maiores estudos das alterações hidrotermais em sistemas epitermais–pórfiro, sobretudo com ênfase na identificação dos produtos metamórficos das rochas hidrotermalizadas em graus variados, assim como estudos de isótopos estáveis, dentre outras ferramentas mais atuais.

Neste contexto, destaca-se que, atualmente, muitos estudos têm sido desenvolvidos em diversas províncias metalogenéticas maduras, como na Escandinávia, por exemplo, onde mineralizações epitermais e do tipo pórfiro de Cu–Au–Mo metamorfisadas têm sido definidas (e.g. KINNUNEN, 2008; NORDIN, 2008). Face à ocorrência de depósito semelhante no Arco Mágmat

de Mara Rosa, pode ser considerado que há potencial para ocorrência de outros depósitos desse tipo no Brasil nas áreas delimitadas na Figura 1.

De modo análogo, faixas móveis como o Cinturão Ribeira (Figura 1), com diversas ocorrências de metais de base conhecidas no Vale do Ribeira em São Paulo e no Paraná, apresentam também potencial para ocorrência de mineralizações epitermais e do tipo pórfiro metamorfisadas. Os corpos de *skarns* mineralizados em cobre na mesma região, como os de Santa Blandina e Itaóca, são também sugestivos para existência de depósitos do tipo pórfiro neoproterozoicos, notadamente em regiões com rochas vulcânicas félsicas nas proximidades, que indicariam nível de erosão ainda não tão avançado.

É bem conhecida a relação existente entre mineralizações epitermais *high-sulfidation* e os pórfiros de cobre e cobre–molibdênio com ouro associado em arcos magmáticos continentais (ARRIBAS JR., 1995; SILLITOE, 2010). Recentemente, foram também caracterizadas mineralizações epitermais *high-sulfidation* metamorfisadas nas fácies anfibolito no Grupo Serra do Itaberaba (SP), do Mesoproterozoico (PÉREZ-AGUILAR et al., 2005, 2014), corroborando o potencial para depósitos do tipo pórfiro metamorfisados no Cinturão Ribeira. Rochas hiper-alumínicas têm sido descritas em diversas sequências metavulcanossedimentares no Brasil e podem ser produto metamórfico de rochas afetadas por alteração argílica avançada, embora poucos estudos sobre esse tema já tenham sido desenvolvidos sobre esse assunto no Brasil.

As sequências metassedimentares de baixo grau do Paleoproterozoico ao Neoproterozoico e, notadamente, as presentes nas bacias ediacarianas associadas aos sistemas de riftes distribuídos ao longo de todo Sudeste e Nordeste do Brasil apresentam vinculação com magmatismo intermediário a félsico com potencial para ocorrência de pórfiros alcalinos de Cu–Au, justificando pesquisas nessas regiões com esse foco exploratório.

Em unidades vulcânicas formadas em arcos continentais, Juliani et al. (2005) descreveram na Província Mineral do Tapajós uma mineralização aurífera epitermal *high-sulfidation* muito bem preservada, de ca. 1,87 Ga, associada a rochas vulcânicas e vulcanoclásticas félsicas do Grupo Iriri *sensu lato*. Essa ocorrência *per se* já definiria um potencial exploratório para pórfiros de cobre e molibdênio (ARRIBAS JR., 1995; SILLITOE, 2010) no Cráton Amazônico. Após essa descoberta, entretanto, um grande número de mineralizações epitermais vem sendo identificado na mesma província, assim como na região do Iriri e do Xingu, incluindo as dos tipos *high*-, *intermediate*- e *low-sulfidation*

(JULIANI et al., 2013), ao longo de uma faixa de mais de 600 km de extensão e 250 km de largura (Figura 1), tanto em rochas de ca. 1,88 Ga como em vulcânicas de 1,97 – 1,95 Ga (TOKASHIKI et al., 2015).

Na Província Mineral do Tapajós, sistemas epitermais *intermediate-sulfidation* mineralizados em ouro e metais de base também se associam a rochas vulcânicas e vulcanoclásticas cálcio-alcalinas félsicas de idades de ca. 2,0 Ga, 1,97 a 1,95 Ga e 1,89 a 1,86 Ga (JULIANI et al., 2013; TOKASHIKI, 2015; TOKASHIKI et al., 2015). Adicionalmente, alterações hidrotermais *low-sulfidation* têm sido verificadas em vulcânicas cálcio-alcalinas de alto potássio e em riolitos alcalinos do tipo A de ca. 1,87 Ga, às quais se associam pórfiros com alterações potássicas, sericitica, propilítica e silicificação, por vezes com sulfetos de metais de base e sulfossais, notadamente de bismuto.

Ainda na Província Mineral do Tapajós, no Chapéu do Sol, Correa-Silva (2002) e Aguja et al. (2013) demonstraram a existência de mineralizações do tipo pórfiro de Cu–Mo, associada a diques de pórfiro riódacítico em riolitos de 1,88 Ga, às quais houve a superposição de mineralização de ouro epitermal *low-sulfidation*. Echeverri-Misas (2010) e Usero et al. (2011) caracterizaram a mineralização de ouro e cobre do Palito como do tipo pórfiro, relacionada a um *stock* de granito tardi-tectônico de alto potássio. Complementarmente, Juliani et al. (2002) definiram a mineralização de ouro do Granito Batalha como magmática–hidrotermal, formada em nível crustal profundo, com alterações hidrotermais semelhantes a sistemas do tipo pórfiro.

Sabe-se que somente os magmas cálcio-alcalinos geram mineralizações *high-sulfidation* (ARRIBAS JR., 1995), mas quando esses fluidos hidrotermais migram para partes mais distais do centro eruptivo, podem ser geradas alterações *low-* ou *intermediate-sulfidation*, devido à neutralização primária dos fluidos ao reagirem com as rochas encaixantes (HEDENQUIST et al., 2000). Assim, as ocorrências de alterações hidrotermais *low-sulfidation* não excluem, em princípio, o potencial para ocorrência de pórfiros de cobre nas regiões citadas. No entanto, comumente, alterações hidrotermais *low-sulfidation* se associam a magmas do tipo I altamente evoluídos, ou do tipo A, aos quais também podem ser vinculados depósitos de classe mundial de Cu–Au (e.g. Cadia Hill, Cadia East e depósitos associados – 44 Moz Au e 7,5 Mt Cu, Lachlan Belt – Austrália) (WOOD, 2012a, 2012b, 2014). Esses depósitos geneticamente associados a pórfiros graníticos alcalinos, se formaram em períodos de tectônica extensional durante o desenvolvimento do arco magmático e constituem, hoje, importantes alvos para a pesquisa mineral de ouro e de cobre.

Juliani et al. (2013, 2014a, 2014b), com base em dados geoquímicos, petrográficos, estruturais, de ambiente de sedimentação e geofísicos, têm indicado que as zonas de cisalhamento arqueanas de Carajás parecem continuar até a Província Mineral do Tapajós, onde serviram de conduto para parte do vulcanismo e controlaram a formação de caldeiras vulcânicas paleoproterozoicas, o que sugere que a crosta arqueana continua por debaixo das sequências paleoproterozoicas, ao menos até o rio Tapajós. A região seria formada, de acordo com esses autores, pela sobreposição de pelo menos dois arcos vulcânicos continentais superpostos, em função da migração causada por alterações no mergulho da placa oceânica, denominados Arcos Tapajônicos. Essa proposição difere das interpretações anteriores, segundo as quais os arcos magmáticos seriam oceânicos e amalgamados a um núcleo arqueano, e também por inferir que a subducção deu-se aproximadamente de sul para norte, e não de sudoeste para nordeste. Essa estruturação parece ter resultado em zonamentos magmáticos e metalogenéticos que, se confirmados, resultarão em um grande potencial para pórfiros de Cu–Au, Cu–Mo–(Au) nas unidades cálcio-alcalinas e de Cu–Au nas suítes graníticas tardias, alcalinas (JULIANI et al., 2013, 2014a, 2014b) (Figura 1).

Em síntese, o ambiente tectônico e os tipos de alterações hidrotermais e mineralizações associadas, com elevado número de ocorrências de calcopirita (predominante), bornita, calcocita, molibdenita, esfalerita, galena e de pirita na Província Mineral do Tapajós são claramente indicativas de um potencial teórico para ocorrência de mineralizações do tipo pórfiro de Cu, e de Cu–Mo com ouro associado na região. Isso poderá, no futuro, propiciar o desenvolvimento de uma nova província mineral para cobre no Brasil.

Mineralizações semelhantes às anteriores têm sido, mais recentemente, descritas na Província Alta Floresta ou Juruena, em terrenos com idades paleo- a mesoproterozoicas, mas provavelmente em um nível de erosão um pouco mais acentuado que o observado em grande parte da Província Mineral do Tapajós. Assis et al. (2014) descreveram diversas mineralizações magmáticas–hidrotermais, podendo ser citados os depósitos de Au–(Cu) do Pé Quente, do Luisão e o X1, e de Au–(Cu–Pb–Zn) do Francisco e do Bigode. Todos esses depósitos foram formados entre ca. 1,78–1,77 Ga e são geneticamente relacionados à colocação de quartzo-feldspato pórfiros da mesma idade, atribuídos às suítes Colíder e Teles Pires (ASSIS, 2015). Independentemente do estilo, e com algumas distinções dos depósitos do tipo pórfiros clássicos, essas mineralizações disseminadas e controladas por estruturas, assim como as anteriormente descritas, são claramente

magmáticas–hidrotermais. Isso indica haver potencial para ocorrência de pórfiros de cobre e de cobre–ouro, em especial nas unidades formadas por magmas mais primitivos e colocados em ambiente crustal mais raso, o que deve ser também considerado nos modelos exploratórios para cobre no Brasil.

Na região de São Félix do Xingu, a sudeste do Cráton Amazônico, afloram pelo menos duas sequências de rochas vulcânicas, pertencentes às formações Sobreiro (cálcio–alcalina) e Santa Rosa (alcalina do tipo A), ambas com idades de ca. 1,88 Ga (JULIANI; FERNANDES, 2010). Nessas rochas, assim como em sub-vulcânicas e em brechas hidrotermais, foram identificadas zonas de alteração hidrotermal potássica, propilítica, sericitica e argílica intermediária (com montmorillonita + caolinita/halloisita + illita) por Cruz et al. (2015), típicas de sistemas magmáticos–hidrotermais, com fluidos derivados da consolidação de magmas misturados em diferentes proporções com águas meteóricas. Esses sistemas hidrotermais se associam predominantemente ao magmatismo alcalino que se desenvolveu no *back-arc* (FERNANDES et al., 2011) e, portanto, poderiam desenvolver pórfiros de cobre e ouro, apesar de haver poucos indícios de metais de base associados às diversas ocorrências de ouro epitermal na região.

Pelo exposto, pode-se concluir que há um grande potencial geológico para exploração de cobre em terrenos de diversas idades em diferentes regiões do país. No entanto, as características da geologia do Brasil, as coberturas de solo e os sistemas minerais identificados, indicam ser importante o desenvolvimento de técnicas e métodos exploratórios e, sobretudo, reforçam a necessidade de levantamentos geológicos mais detalhados e precisos, que busquem não apenas evidências de indícios de mineralizações, mas também de zonas de alteração hidrotermal, metamorfisadas ou não. Essas ações podem abreviar os trabalhos exploratórios e, eventualmente, propiciar a descoberta de novos e importantes depósitos de cobre e, até mesmo o desenvolvimento de novas províncias com produção de cobre no Brasil.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Jorge S. Bettencourt e aos geólogos Roque Fernandes Coelho e Diógenes de Almeida Campos pelas significativas contribuições na revisão desse texto, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Pesquisa (Proc.: CT-Mineral 550342/2011-7, CNPq 481969/2013-6 CNPq 308365/2014-3) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Geociências da Amazônia (Proc.: MCT/CNPq/FAPESPA/PETROBRAS 573733/2008-2) pelo apoio para o desenvolvimento das pesquisas que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMADA, M.C.O.; VILLAS R.N. O depósito Bahia: exemplo de depósito arqueano vulcanogênico de sulfetos de Cu/Au tipo Beshi em Carajás, Pará. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, SBG-NN, Manaus, *Boletim de Resumos Expandidos*, p. 98-101, 1999.
- ARAÚJO, P.S. Salobo Copper/Gold Operation – VALE. SIMEXMIN 2014, ADIMB. 2014. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/14/SJDR/15H%20PAULO%20SILVA%20ARAUJO.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- ARAÚJO, S.M.; FAWCETT, J.; SCOTT, S.D. Metamorphism of hydrothermally altered rocks in a volcanogenic massive sulfide deposit: the Palmeirópolis, Brazil, example. *Revista Brasileira de Geologia*, v. 25, n. 3, p. 173-184, 1995.
- ARENA, K.R.; HARTMANN, L.A.; BAGGIO, S.B. Geological controls of copper, gold and silver in the Serra Geral Group, Realeza region, Paraná, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 63, p. 178-200, 2014.
- ARRIBAS JR. A. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. In: THOMPSON, J.E.M. (Ed). *Magmas, fluids, and ore deposits*. Mineralogical Association of Canada Short Course, v. 23, p. 419-454, 1995.
- ASSIS, R.R. *Depósitos auríferos associados ao magmatismo félsico da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico: litogeoquímica, idade das mineralizações e fonte dos fluidos*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015, 363 p.
- ASSIS, R.R. et al. Metalogênese do setor leste da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014, v. 1, p. 305-340.
- BARNES, S.J. et al. The Santa Rita Nickel Sulfide Deposit in the Fazenda Mirabela Intrusion, Bahia, Brazil: Geology, Sulfide Geochemistry and Genesis. *Economic Geology*, v. 106, n. 7, p. 1083-1110, 2011.
- BETTENCOURT, J.S. Geologia da Mina de Camaquã, RS. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1973.
- BETTENCOURT, J.S. Minéralogie, inclusions fluides et isotopes stables d'oxygène et de soufre de la mine de cuivre de Camaquã, RS (une étude préliminaire). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29, SBG, Ouro Preto, *Anais*, v. 2, p. 409-423. 1976.
- BONGIOLO, E.M. et al. Evidence of Ediacaran glaciation in southernmost Brazil through magmatic to meteoric fluid circulation in the porphyry-epithermal Au-Cu deposits of Lavras do Sul. *Precambrian Research*, v. 189, p. 404-419, 2011.
- BOTELHO, N.F. et al. 2005. Caracterização geológica e metalogenética do depósito de Cu (Au, W, Mo, e Sn) Breves, Carajás. In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS B.W. (Orgs.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, p. 339-389.
- BRENNER, T.L. 2007. *The Fortaleza de Minas nickel, copper, and platinoid deposits: ore types, tectonics, and volcanological aspects*. Tese de Doutorado, IGCE-UNESP, 102 p.
- BRENNER, T.L.; TEIXEIRA, N.A.; OLIVEIRA, J.A.L.; FRANKE, N.D.; THOMPSON, J.F.H. The O'Toole nickel deposit, Morro do Ferro greenstone belt, Brazil. *Economic Geology*, v. 85, p. 904-920, 1990.
- CAMPOS L.D. *O Depósito de Au-Cu Lavra Velha, Chapada Diamantina Ocidental: um exemplo de depósito da classe IOCG associado aos terrenos paleoproterozoicos do Bloco Gavião*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2013, 117 p.
- CARVALHO, S.G.; BRENNER, T.L. 2010. Depósito de Ni-Cu-Co-Au-EGP de Fortaleza de Minas, Minas Gerais. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Ed.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010, p. 99-126.
- CHIARADIA, M. et al. 2006. Origin of fluids in iron oxide-copper-gold deposits: constraints from ^{37}Cl , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Cl/Br. *Mineralium Deposita*, v. 41, p. 565-573.
- CORDEIRO, A.A.C. Pesquisa mineral: panorama atual da CVRD na Amazônia. Simpósio de Geologia da Amazônia, 4, SBG/NO, *Anais*, 1999, p. 80-83.
- CORRÊA-SILVA, R.H. *Caracterização de um sistema epitermal low-sulfidation (adulária-sericita) mineralizado em Au-Cu-Mo em vulcânicas paleoproterozoicas na Província Aurífera do Tapajós: implicações metalogenéticas e tectônicas*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2002, 159 p.
- COX, D.P. et al. Sediment-hosted copper deposits of the world: deposit models and database. USGS Open-File Report 03-107. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-107/>>. 2007.
- CRUZ, R.S. et al. A study of the hydrothermal alteration in Paleoproterozoic volcanic centers, São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil, using short-wave infrared spectroscopy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 304, p. 324-335, 2015.
- DARDENNE, M.A.; SCHOBENHAU, S.C. Depósitos minerais no tempo geológico e épocas metalogenéticas. In: BIZZI, L.A. et al. (Ed.) *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. CPRM, Brasília. 2003.
- DELGADO, L.M.; SOUSA, J.D. Projeto Cobre Curaçá. Geologia Econômica do Distrito Cuprífero do Rio Curaçá, Bahia, Brasil. Relatório Final. CPRM. 1975. v. IA. DNPM/CPRM.
- DIAS, J.R. et al. O corpo Várzea do Macaco e as mineralizações de cromo, níquel e cobre, Complexo Máfico-ultramáfico Jacurici, Cráton São Francisco, Bahia. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, p. 289-308, 2014.
- DNPM. *Informe Mineral 2o/2014* (Julho-Dezembro/2014).
- DOGGETT, M. The role of exploration in future copper supply. SIMEXMIN 2014 ADIMB. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/13/17H05%20MICHAEL%20DOGGETT.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- DREHER, A.M. et al. New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás province, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 161-184, 2008.
- ECHEVERRI-MISAS, C.M. *Evolução magmática, alteração hidrotermal e gênese da mineralização de ouro e cobre do Palito Província Aurífera do Tapajós (PA)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, 2010, 235 p.

- FERNANDES, C.M.D. et al. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences*, v. 30, p. 1-18, 2011.
- FERREIRA FILHO, C.F. et al. *Depósito de Níquel-Cobre Sulfetado de Santa Rita, Itagibá, Bahia, Brasil*. 39. ed. Salvador - Bahia: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 2013. v. 01. 59 p.
- FOO, B. et al. *Technical Report on the Feasibility Study for the Serrote da Laje Project, Alagoas State, Brazil*. NI 43-101 Aura Minerals Inc. Micon International Limited, 2012, 314 p.
- GARCIA, P.M.P. *Metalogênese dos depósitos cupríferos de Caraíba, Surubim, Vermelho e Sussuarana, Vale do Curaçá, Bahia, Brasil*. Dissertação de Mestrado, UFBA, 2013.
- GROVES, D.I. et al. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, v. 105, p. 641-654, 2010.
- HEDENQUIST, J.W.; ARRIBAS JR., A.; GONZALEZ-URIEN, E. Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, v. 13, p. 245-277, 2000.
- HEITHERSAY, P. *Mineral resources for future generations*. SIMEXMIN 2014, ADIMB. 2014. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/15H%20PAUL%20HEITHERSAY.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- HENRIQUE, E.F.; ANDRADE, P.J.M.B.; VALLE, J.G.X.P. Geophysics over the Boa Esperança copper-cobalt deposit, Carajás province, Pará State, Brazil. In: *International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 13, Rio de Janeiro, 2013, SBGF.
- HITZMAN, M.W.; SELLEY, D.; BULL, S. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history. *Economic Geology*, v.105, p. 627-639, 2010.
- HITZMAN, M.W. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when and why? In: PORTER, T.M. (Ed.), *Hydrothermal iron-oxide copper-gold and related deposits: a global perspective*. PGC Publishing, Adelaide, 2000, p. 9-25.
- HITZMAN, M.W.; ORESKES, N.; EINAUDI, M.T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, v. 58, p. 241-287, 1992.
- HUHN, S.R.B. et al. Descoberta do depósito Cu-(Au) Cristalino: Geologia e mineralização associada região da Serra do Rabo – Carajás – PA. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, SBG-NN, *Anais*, Belém, 1999. p. 140-143.
- HUHN, S.R.B. et al. Caracterização geológica do prospecto de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG) Aurora, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geologia*, v. 41, n. 3, p. 525-538, 2011.
- HUHN, S.R.B. et al. Geology of the Riacho do Pontal iron oxide copper-gold (IOCG) prospect, Bahia, Brazil: hydrothermal alteration approached via hierarchical cluster analysis. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 2, p. 309-324, 2014.
- HUHN, S.R.B.; NASCIMENTO, J.A.S. São os depósitos cupríferos de Carajás do tipo Cu-Au-U-ETR? In: COSTA, M.L.; ANGÉLICA, R.S. (Coords.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém: SBG-NN, v. 1, p. 143-160, 1997.
- HUMPHREYS, D. The great metals boom: a retrospective. *Resources Policy*, v. 35, n. 1, p. 1-13, 2010.
- IBRAM. *Informações e análises da Economia Mineral Brasileira – Cobre*. 7ª Edição. 2012.
- ICSG. *Long term availability of copper*. International Copper Study Group. 2013. Disponível em: <http://www.icsg.org/index.php/the-world-of-copper/71-uncategorised/114-long-term-availability-of-copper>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- JULIANI, C. et al. The Batalha Au-Granite system – Tapajós Province, Amazonian Craton, Brazil: hydrothermal alteration and regional implication. *Precambrian Research*, v. 119, p. 225-256, 2002.
- JULIANI, C. et al. Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós Gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints. *Chemical Geology*, v. 215, p. 95-125, 2005.
- JULIANI, C. et al. Estruturação dos arcos magmáticos paleoproterozoicos na porção sul do Cráton Amazônico: implicações geotectônicas e metalogenéticas. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 13, SBG-NN, Belém. 2013 [CD-ROM]
- JULIANI, C. et al. Arcos magmáticos continentais paleoproterozoicos superpostos na porção sul do Cráton Amazônico. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 47, SBG, Salvador, 2014a. [CD-ROM]
- JULIANI, C. et al. Metalogênese da Província Tapajós. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014b, v. 1, p. 229-263.
- JULIANI, C.; FERNANDES C.M.D. Well-preserved Late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 191, p. 167-179, 2010.
- KINNUNEN, A. *A Palaeoproterozoic high-sulphidation epithermal gold deposit at Orivesi, Southern Finland*. Academic Dissertation, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Finland. 2008.
- KLEIN, E.L.; ROSA-COSTA, L.T.; VASQUEZ, M.L. Metalogênese da borda oriental do Cráton Amazônico. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*. CPRM, 2014. p. 171-193.
- KUYUMJIAN, R.M. et al. Depósito de cobre-ouro porfirítico Chapada, Goiás. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN R.M. (Ed.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010. p. 49-70.
- LANCASTER, J.O. et al. Discovery and geology of the Sossego copper-gold deposit, Carajás district, Pará State, Brazil. In: International Geological Congress, 31, *Abstracts*, Rio de Janeiro. 2000. [CD-ROM]
- LEITE, J.A.D. et al. Caracterização do depósito polimetálico (Zn, Pb, Ag, Cu-Au) de Aripuanã, Mato Grosso. In: MARINI, O.J.; RAMOS, B.W.; QUEIROZ, E.T. (Orgs.). *Caracterização de depósitos minerais de distritos mineiros da Amazônia*. Brasília. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, 2005, p. 601-680.

- LIMA T.M., NEVES C.A.R. (Coords). *Sumário Mineral 2014*. Vol. 34. DNPM/MME, Brasília
- LINDENMAYER, Z.G. *Evolução geológica do Vale do Rio Curaçá e dos corpos máfico-ultramáficos mineralizados a cobre*. Dissertação de Mestrado, UFBA, 1982. 140 p.
- LINDENMAYER, Z.G. *Salobo sequence, Carajás, Brasil: geology, geochemistry and metamorphism*. PhD thesis, University of Ontario, Canada, 1990. 407 p.
- LINDENMAYER, Z.G. et al. Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu–Au), Serra dos Carajás, Pará. In: MARINI, O.J.; RAMOS, B.W.; QUEIROZ E.T. (Orgs.). *Caracterização de depósitos minerais de distritos mineiros da Amazônia*. Brasília. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, 2005. p. 137-205.
- LINDENMAYER, Z.G. Depósito de Cu–Au do Salobo, Serra dos Carajás: uma revisão. In: RONCHI, L.H.; ALTHOFF, F.J. (Eds.) *Caracterização e modelamento de depósitos minerais*. Ed. Unisinos, 2003. p. 69-98.
- LISBOA, L.H. D.; ARAÚJO, J.B.; PARENTE, C.V. Indicativo de depósito de cobre epigenéticos associado à bacia molássica de Carnaubinha, Pio IX, Piauí. *Revista de Geologia*, v. 22, p. 233-241, 2009.
- MAAS, M.V.R. et al. Aplicação da geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do Cinturão Cuprífero Orós–Jaguaribe. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 3, p. 279-288, 2003.
- MACHADO, M.A. *Caracterização descritiva e genética de ocorrências cupro-hematíticas no setor sudoeste do sistema Orós–Jaguaribe, Província Borborema*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2006, 118 p.
- MARINI, O.J. *Potencial mineral do Brasil*. Academia Brasileira de Ciências. 2015. (Nesse volume).
- MARSHCHIK, R. et al. Late Archean Cu–Au–Mo mineralization at Gameleira and Serra Verde, Carajás Mineral Province, Brazil: constraints from Re–Os molybdenite ages. *Mineralium Deposita*, v. 39, p. 983-991, 2005.
- MATOS, J.H. da S.N. *Evolução metalogenética da mina de cobre de Pedra Verde (CE)*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2012.
- MEDEIROS NETO, F.A.; VILLAS, R.N. Geologia da jazida de Cu + Au do corpo 4E/Pojuca, Serra dos Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 2, SBG-NN, Belém, *Anais*, v. 3, p. 97-112, 1985.
- MELLO, I.S.C.; BETTENCOURT, J.S. Geologia e gênese das mineralizações associadas ao maciço Itaoca, Vale do Ribeira, SP e PR. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 3, p. 269-284, 1998.
- MELO, G.H.C. *Evolução temporal do depósito de óxido de ferro–cobre–ouro de Salobo, Província Carajás*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 2014.
- MISI, A.; TEIXEIRA, J.B.G.; SÁ, J.H.S. (Orgs.) *Mapa Metalogenético Digital do Estado da Bahia e Principais Províncias Minerais*. CBPM, 2012, 244 p. + 1 CD-ROM.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. 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, 2008a.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Review*, v. 34, p. 317-336, 2008b.
- MONTEIRO, L.V.S. et al. Metalogênese da Província Carajás. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014, v. 1, p. 43-91.
- MORETO, C.P.N. et al. 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, 2015a.
- MORETO, C.P.N. et al. 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, 2015b.
- MOTA-E-SILVA, J. et al. Geology, petrology and geochemistry of the “Americano do Brasil” layered intrusion, central Brazil, and its Ni–Cu sulfide deposits. *Mineralium Deposita*, v. 46, p. 57-90, 2011.
- MOTA-E-SILVA, J.; FERREIRA FILHO, C.F.; GIUSTINA, M.E.S.D. The Limoeiro Deposit: Ni–Cu–PGE Sulfide Mineralization Hosted Within an Ultramafic Tubular Magma Conduit in the Borborema Province, Northeastern Brazil. *Economic Geology*, v. 108, p. 1753-1771, 2013.
- MOTA-E-SILVA, J. et al. Platinum-group minerals in the Limoeiro Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit, Brazil: the effect of magmatic and upper amphibolite to granulite metamorphic processes on PGM formation. *Mineralium Deposita*, Online First, 2015. DOI: 10.1007/s00126-015-0585-0. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00126-015-0585-0>>. Acesso em 30 de setembro de 2015.
- MOTTRAM, S.O. Projeto Cobre/Ouro Estágios I e II (Rio Verde e Pedra Branca, Pará) - Building a copper producer in Carajás – Avanco Resources Limited. *SIMEXMIN 2014*, ADIMB. 2014. Disponível em: <<http://www.adimb.com.br/simexmin2014/pdfs/14/SJDR/17H55%20SIMON%20MOTTRAM.pdf>>; Acesso em 30 de agosto de 2015.
- MUDD, G.M.; WENG, Z.; JOWITT, S.M. A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments. *Economic Geology*, v. 108, p. 1163-1183, 2013.
- NCL BRASIL. *Revision de La Estimación de Recursos del Proyecto Cristalino*. Vale S.A Internal Report, 2005, p. 1-103.
- NORDIN, R. The Aitik copper mine, Sweden – Exploration and expansion. In: International Geological Congress, 33, IUGS, Oslo, 2008.
- NUNES, A.R. et al. A descoberta do depósito Breves da Província Mineral de Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, SBG-NN, p. 57-60. 2001. [CD-ROM]
- NUNES, C.M.D. *Caracterização de um sistema epitermal high-sulfidation paleoproterozoico na Província Aurífera do Tapajós, Pará*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. 2001, 174 p.
- OLIVEIRA, C.G. et al. Metalogênese do Arco Magmático Goiás. In: SILVA, M. da G. et al. (Orgs.). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014, v. 1, p. 455-466.

- OLIVEIRA, I.W.B. *Cobre de Bom Jardim, Estado de Goiás*. Informe de Recursos Minerais. Série Oportunidades Minerais - Exame Atualizado de Projeto, nº 03, CPRM, 2000, 18 p.
- OLIVEIRA, S.M.B. *Os depósitos de níquel laterítico do Brasil*. Tese de Livre-Docência. Universidade de São Paulo. 1990. 92 p.
- PARENTE, C.V.; ARTHAUD, M.H. Geologia e tipologia do minério da ocorrência de Cu-Fe associada à sequência metavulcano-sedimentar Cahoeirinha, região de Aurora, CE. *Revista e Geologia*, v. 17, p. 157-172, 2004.
- PARENTE, C.V. et al. Contexto geológico, tipológico e geoquímico isotópico das brechas hidrotermalizadas de ferro e cobre tipo IOCG, associadas à bacia eo-paleozoica Jaibaras, da Província Borborema, Brasil. In: FRANTZ, J.C.; MARQUES, J.C.; JOST, H. (Org.). *Contribuições à Metalogenia do Brasil*. Porto Alegre: UFRGS, 2011, v. 1, p. 175-200.
- PARISOT, J.-C. et al. Dispersão e acumulação do cobre nos produtos do intemperismo de depósitos cupríferos do Brasil. *Revista do Instituto de Geociências USP*, v. 11, n. 2, p. 21-33, 1990.
- PEREZ-AGUILAR A. et al. Stable isotopic constraints on Kuroko-type paleohydrothermal systems in the Mesoproterozoic Serra do Itaberaba Group, São Paulo State, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, p. 305-321, 2005.
- PEREZ-AGUILAR A. et al. Produtos metamórficos de sistemas high-sulfidation oceânicos mesoproterozoicos, Grupo Serra do Itaberaba, SP. *Revista do Instituto Geológico*, v. 35, p. 1-17, 2014.
- PESTILHO, A.L.S. *Sistemática de isótopos estáveis aplicada à caracterização da evolução dos paleo-sistemas hidrotermais associados aos depósitos cupríferos Alvo Bacaba e Alvo Castanha, Província Mineral de Carajás, PA*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP. 2011.
- PINHO, F.E.; BARBOZA, E.S.; FERNANDES, C.J. Depósito de cobre de Cabaçal, Mato Grosso. In: BRITO R.S.C., SILVA M.G., KUYUMJIAN R.M. (Eds.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010. p. 127-146.
- REIS, F.N.; VILLAS, R.N. Mineralização e alteração hidrotermal no depósito cupro-aurífero de Serra Verde, Província Mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, p. 69-86, 2002.
- REMUS, M.V.D. et al. The Camaquã Cu-(Au-Ag) and Santa Maria Pb-Zn-(Cu-Ag) mines of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. In: SILVA, M.G.; MISI, A. (Ed.) *Base Metal deposits of Brazil*, MME/ CPRM/DNPM, Belo Horizonte, 1999, p. 54-63.
- RENAC, C. et al.. Isotopic fluid changes in a Neoproterozoic porphyry-epithermal system: The Uruguay mine, southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 60, p. 146-160, 2014.
- RÉQUIA, K. et al. Re-Os and Pb-Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 727-738, 2003.
- RIGON, J.C. et al. Alvo 118 copper-gold deposit: geology and mineralization, Serra dos Carajás, Pará, Brazil. In: *International Geological Congress*, 31, Rio de Janeiro, SBG-IUGS. 2000 [CD-ROM]
- SCHWARZ, M.; FRANTZ, J.C. Depósito de Cu-Zn Pojuca Corpo Quatro: IOCG ou VMS? *Pesquisas em Geociências*, v. 40, n. 1, p. 5-19, 2013.
- SILLITOE, R. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, v. 105, p. 3-41, 2010.
- SILVA, C.M.G., VILLAS, R.N. The Águas Claras Cu-sulfide ± Au deposit, Carajás region, Pará, Brazil: geological setting, wall-rock alteration and mineralizing fluids. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 3, p. 315-326, 1998.
- SILVA, L.C. et al. U-Pb SHRIMP ages in the Itabuna-Caraíba TTG high-grade complex: the first window beyond the Paleoproterozoic overprinting of the eastern Jequié Craton, NE Brazil. In: *International Symposium. Granites and Associated Mineralizations*, 2, Salvador, *Extended Abstracts*, 1997. p. 282-283.
- SILVA, M.G. et al. Geologia e mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT46 (Igarapé Cinzento, Carajás). In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W. (Eds.) *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DNPM-CT-Mineral-FINEP-ADIMB, 2005. p. 94-151.
- SILVA, M.G. et al. Metalogênese do Setor Setentrional do Cráton do São Francisco. In: SILVA, M.G. et al. (Orgs.) *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*. CPRM, 2014. p. 93-118.
- SYKES, J.P.; PACKY, D.J.; TRENCH, A. An economist, a scientist and a geologist walk into a bar and discuss resource depletion. Centre for Exploration Target. CET Newsletter, v. 25, p. 1-4. 2013. Disponível em: <<http://www.cet.edu.au/secure-pdf/depletion.pdf>>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- TALLARICO, F.H.B. *O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil*. Tese de Doutorado, UNICAMP, 2003. 229 p.
- TALLARICO, F.H.B. et al. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 39, p. 68-86, 2004.
- TALLARICO, F.H.B. et al. 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, 2005.
- TALLARICO, F.H.B.; MELLITO, M.K.; BABINSKI M. 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, 2003.
- TEIXEIRA, J.B.G. et al. Depósitos de cobre do Vale do Rio Curaçá, Bahia. In: BRITO, R.S.C.; SILVA M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Ed.) *Modelos de depósitos de Cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010a. p. 71-96.
- TEIXEIRA, J.B.G.; LINDENMAYER, Z.G.; SILVA M.G. Depósitos de óxido de Fe, Cu-Au de Carajás. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Org.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010, p. 15-48.
- TEIXEIRA N.A. et al. Alkaline Porphyry Copper Deposits And Iocg – What Is The Link? In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 14, SBG/NO, 2015 [CD-ROM].
- TILTON, J.E. *World metal demand: trends and prospects*. Resources for the Future Press, 2015. 368 p.

- TOKASHIKI, C. do C. *Mineralizações low- e intermediate-sulfidation de ouro e de metais de base em domos de riolito paleoproterozoicos na porção sul da Província Mineral do Tapajós*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências – USP, 2015.
- TOKASHIKI, C. do C. et al. Eventos vulcânicos de 1,97 Ga com mineralizações de ouro epitermais low- e intermediate-sulfidation na porção sul da Província Mineral do Tapajós (PA). In: GORAYEB, P.S.S.; LIMA, A.M.M. (Org.) *Contribuições à Geologia da Amazônia*, SBG-NN, v. 9, p. 119-138, 2015.
- TONIOLO, J.A.; REMUS, M.V.D.; REISCHL, J.L. Depósito de cobre das Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul. In: BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN, R.M. (Ed.) *Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo*. CPRM, 2010. p. 163-188.
- TORRESI, I. et al. Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope systematics of the Alvo 118 iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province (Brazil): implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, v. 47, p. 299-323, 2012.
- USERO, G. et al. Estudo das inclusões fluidas da mineralização paleoproterozoica de Au–(Cu) do tipo pórfiro do Palito, Província Aurífera do Tapajós (PA). In: FRANTZ, J.C.; MARQUES, J.C., JOST H. (Orgs.). *Contribuições à metalogenia do Brasil*. Porto Alegre. UFRGS/IG, v. 1, p. 111-128, 2011.
- VASQUEZ, M.L.; SOUSA, C.S.; CARVALHO, J.M.A. (Org.) 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. 2008.
- VEIGEL, R., DARDENNE, M.A. Paragênese e sucessão mineral nas diferentes etapas de evolução da mineralização Cu–Pb–Zn do Distrito Camaquã, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 20, p. 55-67, 1990.
- VILLAS, R.N. et al. Relações entre deformação, alteração hidrotermal e mineralização no depósito Cu–Au do Sossego, Província Mineral de Carajás. In: Simpósio Brasileiro de Metalogenia, 1, Gramado. 2005. [CD-ROM]
- VILLAS, R.N.; SANTOS, M.D. Gold deposits of the Carajás Mineral Province: deposit types and metallogenesis. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 300-331, 2001.
- VOTORANTIM METAIS. *Mineral Exploration: Main Projects – Aripuanã*. Disponível em: <<http://www.vmetais.com.br/en-US/Negocios/ExploracaoMineral/PrincipaisProjetos/Pages/Aripuana.aspx>>. Acesso em 30 de Agosto de 2015.
- WOOD, D. Discovery of the Cadia deposits, NSW, Australia (Part 1). *SEG Newsletter*, January, 2012, n. 88, 2012a.
- WOOD, D. 2012b. Discovery of the Cadia deposits, NSW, Australia (Part 2). *SEG Newsletter*, April, 2012, n. 89, 2002b.
- WOOD, D. Creating Walth and avoiding Gambler's ruin - Newcrest Mining Exploration, 1991–2006. *SEG Newsletter*, January, 2014, n. 96. 2014.
- XAVIER, R.P. et al. Fluid evolution in the Paleoproterozoic intrusion-related Breves Cu–Au–(Mo–W–Bi–Sn) deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. *Contribuição à Geologia da Amazônia*, SBG-NN, 2005. v. 4: p. 129-137.
- XAVIER, R.P. et al. Tourmaline B-isotopes fingerprint marine evaporites as the source of high-salinity ore fluids in iron oxide–copper–gold deposits, Carajás Mineral Province (Brazil). *Geology*, v. 36, p. 743-746, 2008
- XAVIER, R.P. et al. The iron oxide copper gold deposits of the Carajás Mineral Province, Brazil: an updated and critical review. In: PORTER, T.M. (Ed.) *Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: a global perspective*. Australian Mineral Fundation, Adelaide, v. 3, p. 285-306. 2010.
- XAVIER, R.P. et al. The iron oxide copper–gold systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. In: *Geology and genesis of major copper deposits and sistricts of the world: a tribute to Richard Sillitoe*. Special Publication of the Society of Economic Geologists, v. 16, p. 433-454, 2012.
- YAMANA GOLD. *CSR Report*. 2014. 74 p. Disponível em: <www.yamana.com/operations/reservesandresources>. Acesso em 30 de agosto de 2015.
- YAMANA GOLD. *First Quarter Report*, 2015. 76 p. Disponível em: <www.yamana.com/operations/reservesandresources>. Acesso em 30 de agosto de 2015.