Capítulo 6. O reator em operação: geologia e metalogênese de Carajás, 2,76–2,45 Ga

Da abertura de Itacaiúnas ao rifte precursor de Buritirama, o horizonte de ferro, as salmouras confinadas e três gerações de um sistema mineral

Modelo de trabalho

A extensão de 2,76 a 2,73 Ga abriu a bacia e alojou basaltos, intrusões acamadadas e granitoides em estruturas verticais herdadas. O horizonte de ferro organizou o confinamento e a reação. A circulação de água do mar pela pilha gerou salmouras em episódios sucessivos. Cada pulso térmico renovou a circulação, reutilizou condutos antigos e acrescentou uma geração mineral. O sistema hidrogeológico com recarga fria e descarga quente, a transferência de capacidade de oxidação a partir do horizonte de ferro e a pluma de 2,51 a 2,45 Ga são hipóteses deste livro; as idades, as salinidades e a alteração regional que elas encadeiam são medidas.

Itacaiúnas · Formação Carajás · IOCG · salmoura · válvula de falha · aquitardo · escapolita · Luanga · Salobo · Serra Verde · Buritirama · Neoarqueano–Sideriano · ca. 2,76–2,45 Ga

Resumo

Este capítulo acompanha os trezentos e dez milhões de anos em que o reator de Carajás esteve em operação. O capítulo 5 mostrou como a bacia precipitou ferro na luz. Aqui o foco desce para dentro da crosta, onde a água, o calor e a memória estrutural converteram o recipiente sedimentar num sistema mineral que produziu, além do ferro, uma das maiores províncias de cobre e ouro do planeta.

O sistema amadureceu em etapas. O magmatismo neoarqueano forneceu calor, rocha fértil e fluidos; a água do mar que desceu pela pilha vulcânica virou salmoura; cúpulas graníticas e diques acionaram descargas sucessivas. Um primeiro regime de cobre e ouro funcionou entre ca. 2,72 e 2,68 Ga. A reativação de 2,61 a 2,55 Ga abriu fraturas novas e alcançou volumes frescos da pilha. Um pulso terminal, proposto para 2,51 a 2,45 Ga, encerrou a fase mais longa do reator. O Granito Buritirama, de 2,55 Ga, registra o magmatismo precursor de uma margem cuja plataforma sedimentar só amadureceria no Riaciano.

A tese é cartográfica. Geologia e metalogênese formam um único corpo histórico. A estrutura herdada escolhe os corredores; permeabilidade, pressão e reação escolhem os instantes de descarga; a rocha atravessada pelo fluido define a carga que chega ao sítio. Os depósitos maiores empilham gerações sobre as mesmas perfurações. O reator troca de fonte de calor e conserva a planta.

1. A bacia que é, ela mesma, o minério

Os capítulos anteriores fabricaram a placa, abriram a margem de 3,2 Ga, fecharam o ciclo mesoarqueano, instalaram a bacia extensional de 2,76 a 2,73 Ga e mostraram como o oceano ferruginoso e a zona fótica

transformaram fluxos de ferro, enxofre e nutrientes num BIF gigante. Agora o que interessa está embaixo do jaspilito.

Quem mapeia Carajás percebe cedo que a alteração hidrotermal, as rochas transformadas por fluidos quentes, não fica em volta das minas. Ela ocupa um volume regional, atravessa contatos e alcança embasamento, vulcânicas, sedimentos e intrusões. Sódio e cálcio foram acrescentados a grandes volumes de rocha; potássio e ferro a outros; sílica a corredores inteiros. Essa continuidade muda a escala do objeto. O sistema mineral pode ser mapeado como uma unidade, com limites, fácies internas e história de deformação. Salobo, Sossego, Igarapé Bahia, Serra Verde, Antas e os demais depósitos são máximos locais dentro dela. A província vem primeiro. Os corpos de minério são seus pontos de descarga mais eficientes (Xavier et al., 2012; Grainger et al., 2008).

Três condições foram preparadas devagar e mobilizadas depois. A placa rasa do capítulo 4 teria hidratado o manto antes da ruptura. A água do mar hidratou e alterou a pilha vulcânica; reativações posteriores renovaram a circulação e fizeram novas águas percorrerem a crosta. A crosta hidratada e enfraquecida respondeu primeiro ao rifte seguinte. Em cada caso, o efeito aparece dezenas ou centenas de milhões de anos depois da preparação. A idade do minério data a descarga. A arquitetura que a tornou possível costuma ser mais antiga.

Essa defasagem explica a persistência de Carajás. O reator troca a fonte de calor e conserva a planta. Suturas, falhas, contatos, cúpulas, camadas impermeáveis e condutos sobrevivem aos pulsos que os utilizam. Reação e lixiviação aumentam a permeabilidade em alguns trechos e selam outros. O circuito ganha memória. Por isso a história mineral de Carajás acumula idades em vez de escolher uma só.

2. O que é um IOCG

A sigla vai aparecer em todo o capítulo e merece ser aberta. IOCG vem do inglês e quer dizer óxido de ferro, cobre e ouro. O nome descreve o que se vê. Depósitos em que o cobre, na forma de calcopirita, e o

ouro vêm acompanhados de grandes volumes de magnetita ou hematita, em brechas, veios e substituições de rocha, cercados por alteração que acrescentou sódio, cálcio, potássio e ferro às encaixantes. A classe foi reconhecida como família mundial nos anos 1990 (Hitzman et al., 1992), com membros na Austrália, no Chile, na Suécia e no Canadá. Carajás é o maior conjunto conhecido de idade arqueana, e Salobo, uma de suas minas, está entre as maiores de cobre do Brasil.

Um IOCG não é um vulcão nem uma fumarola do fundo do mar. É um sistema hidrotermal que trabalha dentro da crosta, a quilômetros de profundidade, sem sair para a superfície. Isso faz dele um problema de encanamento. Para entender um, é preciso responder às mesmas cinco perguntas que organizam todo depósito mineral e que o capítulo 15 vai levar à escala da galáxia. De onde vêm os metais e os fluidos. O que os põe em movimento. Por onde eles passam. O que os obriga a largar a carga. E o que preservou o resultado. Este capítulo responde às cinco para Carajás, na ordem em que a província as respondeu.

3. A descarga, em uma página

O capítulo 4 contou a carga. Uma sutura larga, uma placa rasa que resfriou e hidratou o manto durante setenta milhões de anos de silêncio, e uma ruptura em ca. 2,76 Ga que abriu a janela. Aqui basta lembrar o produto. Entre 2,76 e 2,73 Ga, a bacia de Itacaiúnas estava em extensão, com estruturas verticais de abertura alojando a pilha vulcânica, os corpos máfico-ultramáficos e parte dos granitoides. Os basaltos preservam a assinatura de fonte hidratada que o capítulo 4 explicou, dentro de uma arquitetura que Martins et al. (2017) interpretaram como rifte continental ligado à ruptura de placa e à ascensão do manto. A assinatura pertence à história da fonte; a extensão registra o ambiente em que a fonte fundiu.

O oeste dos Estados Unidos, que serviu de análogo para a carga, também serve para a descarga. Depois que a placa rasa do Laramide afundou, o manto quente voltou a ocupar o espaço sob uma litosfera que tinha sido hidratada, e o resultado foi o maior surto de vulcanismo ex-

plosivo do registro recente, entre trinta e seis e dezoito milhões de anos atrás, seguido pela extensão que abriu as bacias e serras do Great Basin (Humphreys et al., 2003; Best et al., 2016). Carajás pertence a outro planeta térmico e a outro ambiente deposicional. O manto arqueano era mais quente, a ruptura foi localizada por uma sutura e a bacia encheu debaixo d'água. O paralelo vale pela ordem dos processos, carga e depois descarga, e por mostrar como uma fonte guarda memória de subducção antes de fundir num regime novo.

A expressão retroarco sem arco, usada uma vez no capítulo 5, descreve essa herança espacial e não volta a ser necessária. O nome do ambiente é rifte extensional. A hipótese prevê uma evolução vertical da assinatura dos magmas, com contribuição do manto litosférico mais forte no começo e participação crescente do manto profundo depois. Também prevê coincidência entre fertilidade mineral, sutura e domínios de manto mais hidratados. Geoquímica de séries completas, isótopos em zircão e geofísica da litosfera podem testar essa passagem.

4. A bacia compensada e o horizonte de ferro

O vulcanismo começa em torno de 2,76 Ga e acompanha a abertura. Metadacitos de Serra Arqueada e Igarapé Gelado e as unidades de Luanga ocupam a mesma janela. Lava e material vulcânico fragmentado preenchem o espaço à medida que ele nasce; subsidência e aporte magmático caminham juntos, de modo que o relevo das margens permanece pequeno durante a fase principal. A escassez de conglomerados e arenitos na base da bacia deixa então de pesar contra a leitura de rifte. Ela registra uma bacia em que o vulcanismo compensava o espaço criado. Hokuroku, no Japão, Blake River, no Canadá, e Taupo, na Nova Zelândia, mostram versões desse princípio em outras idades, rifteamento assistido por magma, preenchimento vulcânico rápido e circulação hidrotermal dentro da pilha (Cathles et al., 1983; Ohmoto, 1996).

Carajás acrescenta uma escala ferrífera extraordinária, e a bacia já era hidrotermal antes de ser ferrífera. Exalitos, as crostas que precipitam

onde o fluido quente sai no fundo do mar, cherts, rochas ricas em turmalina, sulfetos e rochas de cordierita e antofilita desenham um campo ativo no assoalho. Pojuca conserva a expressão de cobre e zinco desse substrato, um pequeno VMS. Chaminés de alteração registram perda intensa de massa e empobrecimento de cobre ao longo do caminho de subida. Antes do IOCG, a bacia já tinha condutos de alimentação, bocas de saída e uma rede de recarga.

A Formação Carajás cresce dentro desse sistema. Idades de metadacitos separados por centenas de metros de formação ferrífera, intercalações vulcânicas e clastos de jaspilito em brechas mostram um intervalo recorrente, depositado durante milhões de anos (Trendall et al., 1998). O horizonte de ferro integra a bacia vulcânica. A transição entre os grupos Fortescue e Hamersley, na Austrália, oferece o paralelo estratigráfico. O ferro químico reaparece ao longo do preenchimento e ocupa um intervalo, em vez de funcionar como uma tampa depositada no último instante.

Esse horizonte desempenha três papéis, e o primeiro exige uma palavra nova. Aquitardo é uma camada que deixa a água passar muito devagar. Numa pilha de rochas, ele funciona como a tampa de uma panela de pressão. Por baixo dele a pressão do fluido pode subir muito acima do normal, porque a água aquecida não tem por onde escapar. O jaspilito, com sua matriz de chert e óxido, é um aquitardo regional. Outros também fazem isso, como o contato entre a bacia e o embasamento, os tetos das intrusões e os tufos compactos. A Formação Carajás se destaca pela extensão e pela continuidade, e por isso concentra muitos dos maiores pontos de alívio da província.

O segundo papel é químico e pertence ao modelo de trabalho. Os óxidos de ferro do jaspilito são, numa crosta anterior ao Grande Evento de Oxidação, um dos poucos reservatórios de ferro já oxidado. Um fluido que reage com esse reservatório pode levar consigo, para baixo, parte dessa capacidade de oxidar, e recuperá-la perto de um conduto. O vínculo entre BIF e mineralização rica em magnetita torna-se testável. Sistemas de óxido anteriores ao oxigênio atmosférico dessa classe deveriam se concentrar em colunas com grandes reservatórios ferrífe-

ros reativos. A hipótese exige mineralogia, balanço de massa e estados de oxidação resolvidos ao longo do percurso.

O terceiro papel é mecânico. Bocas de saída, redes de veios e chaminés hidrotermais perfuraram o horizonte desde a deposição. Quartzo, magnetita e silicatos de ferro selaram várias dessas aberturas; novos pulsos voltaram a rompê-las. A pressão se reconstrói atrás do selo e procura os mesmos pontos fracos. Cada ciclo amplia a brecha, precipita cimento e prepara outra ruptura. O reservatório reativo e o arranjo de alívio ocupam, muitas vezes, o mesmo objeto geológico. Aí está a força do horizonte.

5. O motor e as salmouras

O magma acrescentado à base da crosta aquece o sistema e produz dois andares. Embaixo, Luanga, Vermelho, Cateté, Pium e corpos equivalentes alojam os cumulatos máfico-ultramáficos do capítulo 2 ao longo das estruturas profundas. Níquel e platina ficam no sistema magmático, e sua presença comprova a fertilidade do reservatório do manto (Begg et al., 2010; Lightfoot e Evans-Lamswood, 2015). Em cima, fusão da crosta e mistura geram granitoides ferroanos, charnockitos e corpos potássicos entre ca. 2,76 e 2,68 Ga. Planalto, Estrela, Serra do Rabo e Igarapé Gelado registram a duração da anomalia térmica (Sardinha et al., 2006; Barros et al., 2009; Feio et al., 2013; Dall'Agnol et al., 2017).

A petrologia controla a descarga hidrotermal. A modelagem de Mesquita et al. (2025) descreve magmas ricos em água, reduzidos e que só liberam seu fluido no fim da cristalização. Essa evolução concentra voláteis residuais nas cúpulas, os topos abaulados dos plútons, e torna plausível que o fluido escape perto do teto, onde fraturas e diques ligam o plúton à pilha. Texturas gráficas nas partes rasas, com quartzo e feldspato entrelaçados, preservam o instante em que líquido, cristais e fluido passaram a dividir o mesmo espaço. O granito fornece calor, pressão, agentes que mantêm metais em solução, enxofre e uma carga própria de elementos que gostam de granito, como urânio, terras raras, flúor, molibdênio, tungstênio, estanho e bismuto. A maior parte

do cobre, como a seção 7 vai mostrar, é adquirida no caminho.

Depois de ca. 2,73 Ga, o magmatismo máfico diminui e a bacia passa a registrar subsidência e sedimentação clástica. Relevo, erosão e suprimento surgem nas margens; sedimentos mais finos ocupam os setores centrais. A Formação Serra Sul foi depositada depois de 2.684 ± 10 Ma, idade máxima fornecida pelos zircões detríticos (Rossignol et al., 2020). Vale explicar o que esse número diz. O zircão detrítico mais jovem de um arenito é como a moeda mais nova encontrada dentro de um cofre. O cofre não pode ter sido fechado antes de a moeda existir, mas pode ter sido fechado muito depois. A idade do grão limita o acontecimento sem datá-lo. Tufos ácidos e níveis finos acrescentam contrastes de baixa permeabilidade, e a pilha vulcânica passa a funcionar como um grande reservatório confinado.

A água desse reservatório tinha vindo do mar, e o que ela virou lá dentro tem número. A água do mar tem cerca de 3,5 por cento de sal. Os fluidos que formaram os depósitos de Carajás tinham várias dezenas de por cento, mais sal que água em alguns casos. Sabe-se disso porque os cristais que cresceram desses fluidos aprisionaram gotas minúsculas deles, as inclusões fluidas, bolhas de poucos micrômetros que guardam o fluido original como uma garrafa lacrada. Aquecidas e resfriadas ao microscópio, elas devolvem a salinidade e a temperatura do fluido que as formou (Dreher et al., 2008). Uma água assim se chama salmoura. Ela é um solvente muito melhor para metais do que a água do mar, porque o cloro em excesso forma com o cobre, o ferro e o ouro complexos solúveis que a água pura não forma.

O modelo propõe uma arquitetura regional capaz de gerar e canalizar salmouras em episódios sucessivos. A água do mar penetrou nas fraturas, reagiu com a pilha e adquiriu salinidade durante hidratação, alteração e circulação profunda, deixando a água nos minerais e concentrando o sal no que sobrou. Topos vesiculares dos derrames, juntas de resfriamento, camadas clásticas e falhas ligaram recarga e descarga. A escapolita, um silicato parecido com o feldspato que guarda cloro em sua estrutura, e as assembleias de cálcio e sódio conservam o recibo químico dessa circulação, nunca a mesma água imobilizada entre

os pulsos. Uma fonte alternativa para o sal, camadas de evaporito dissolvidas pelo fluido, foi proposta para outros IOCG (Barton e Johnson, 1996) e não é necessária aqui, embora não esteja excluída.

O pulso térmico ativa o reservatório. Salmoura da bacia e fluido magmático se encontram perto de uma cúpula, de um dique ou de uma falha profunda. Temperatura, acidez, pressão e estado de oxidação mudam; o híbrido passa a lixiviar a pilha máfica, isto é, a dissolver e carregar o que ela tem de metal. O componente magmático entrega acidez, enxofre e os elementos granitófilos. Basaltos e rochas intermediárias fornecem grande parte do cobre, do ouro e do ferro. A associação de elementos num depósito registra, assim, onde o fluido foi ativado e quanto de pilha atravessou.

6. A válvula

A descarga opera por válvula de falha, um mecanismo descrito por Sibson (1990) para veios de ouro e aplicável a qualquer fluido confinado sob pressão. Sob o aquitardo, a pressão do fluido sobe até vencer a resistência da rocha. Uma falha abre, o fluido acelera pela abertura e descomprime, minerais precipitam e entopem o conduto, a abertura sela, a pressão volta a subir e o ciclo recomeça (Cox, 2005). Cada ciclo deixa uma camada de cimento e uma brecha.

Uma garrafa de água com gás deixada ao sol oferece a escala doméstica do mecanismo. Aquecida, ela retém menos CO□ dissolvido e acumula mais pressão. Quando a tampa abre, a queda brusca de pressão separa o gás do líquido, a água espuma e extravasa. A mesma garrafa, tirada da geladeira, abre com muito menos violência. Também descomprime e libera gás, mas conserva o líquido. No sistema hidrotermal a falha faz o papel da tampa. Sua abertura despressuriza um fluido quente, pode levá-lo à ebulição e desmonta os complexos de cloro que mantinham os metais em solução. O fluido perde capacidade de carga. O metal fica nas fraturas.

A regra cabe em três variáveis. A quantidade de metal que uma sal-

moura carrega cresce com a temperatura, com a pressão e com a concentração de cloro. Qualquer queda brusca em uma delas obriga o fluido a largar parte da carga. A válvula de falha derruba as três de uma vez. É por isso que os depósitos ficam nas falhas, e não espalhados pela pilha.

Brecha de brecha marca repetição. Um sítio grande é um ponto que drenou amplo volume de rocha muitas vezes. Essa dinâmica aproxima Carajás de um sistema VMS cuja saída foi fechada pelo confinamento. Recarga distribuída, descarga focalizada, chaminés raras e forte fluxo ascendente. No fundo do mar aberto, o fluido ventila e produz sulfeto maciço, como no capítulo 5. Sob o selo, ele substitui rocha, forma brecha e constrói corpos de óxido e sulfeto dentro da coluna. O IOCG é, nessa leitura, o VMS que não conseguiu sair.

7. O primeiro regime de cobre e ouro, ca. 2,72–2,68 Ga

O primeiro regime usa as cúpulas graníticas como motores. O depósito GT-46 ancora diretamente a janela no cinturão norte (Toledo et al., 2019), e idades equivalentes em sistemas do sul mostram alcance provincial (Moreto et al., 2015). A molibdenita de Bacuri, datada em 2.758 $\pm$ 11 Ma pelo relógio rênio-ósmio, sugere que circuitos locais funcionavam enquanto a arquitetura ainda amadurecia. Água do mar descia pela pilha, encontrava calor e fluido magmático e retornava pelos pontos de alívio. O confinamento ampliou depois o raio e a duração desses circuitos.

Bacaba, Bacuri e Visconde ajudam a reconstruir a direção do fluxo. Esses corpos ficam no embasamento, abaixo do horizonte de ferro, e contêm magnetita. O fluido mineralizante chegou subindo. Sua história anterior incluiu recarga pela bacia e reação com os níveis superiores. O ramo de carga desce; o ramo que forma minério sobe. Essa geometria explica como uma assinatura adquirida perto do horizonte reaparece em profundidade.

A pilha máfica tem cobre suficiente para abastecer o distrito, e a conta cabe na mesa da cozinha. Um basalto comum carrega cerca de cem gramas de cobre por tonelada, dispersos nos minerais, invisíveis a olho nu. Tome um bloco da Formação Parauapebas com cinquenta quilômetros de comprimento, trinta de largura e três de espessura, uma fração da pilha real. São quatro mil e quinhentos quilômetros cúbicos, perto de treze trilhões de toneladas de rocha, e portanto algo como um bilhão de toneladas de cobre disperso. O cobre contido em todos os depósitos conhecidos de Carajás soma algumas dezenas de milhões de toneladas. Bastaria extrair poucos por cento do que o bloco contém. As chaminés de alteração mostram empobrecimentos muito acima dessa média. O sinal regional esperado é, por isso, heterogêneo. Corredores empobrecidos ao lado de grandes volumes pouco modificados. Um teste estatístico que mistura os dois dilui exatamente a anomalia procurada.

Os granitos reduzidos entram com outra função. Granitos pobres em oxigênio dissolvido podem reter o cobre em sulfetos magmáticos e liberar fluidos relativamente pobres nesse metal, enquanto fornecem calor, voláteis e os agentes que mantêm metais em solução. Essa formulação evita exigir uma fonte única. Parte da carga magmática chega diretamente; o volume principal pode ser lavado das rochas atravessadas. A regra operacional fica simples. O hospedeiro mostra onde o fluido parou. O caminho a montante informa o que ele carregava.

Os depósitos ocupam níveis distintos da coluna. Alguns se alojam no horizonte de ferro e em suas perfurações; outros cortam a pilha vulcânica, descem ao embasamento ou aparecem em intrusões; plumas de fluido alcançam até a cobertura clástica. Granitoides são destinos menos férteis para metais-base quando o circuito permanece dentro deles. A eficiência do ponto de alívio controla o tamanho. A rocha atravessada controla a associação de metais.

8. A reativação e o segundo regime, ca. 2,61–2,45 Ga

Depois de um intervalo de relativa estabilidade, a crosta volta a ceder. Entre ca. 2,61 e 2,55 Ga, estruturas profundas reabrem num domínio hidratado e intensamente alterado. Marschik et al. (2005) leram parte dessa janela como inversão e mudança de regime estrutural. Este livro testa outra possibilidade. Uma nova fase extensional teria explorado a litosfera preparada e iniciado o rifte precursor de Buritirama. As idades hidrotermais demonstram reativação; a cinemática regional e sua duração continuam em debate.

Serra Verde, Gameleira, Salobo e Igarapé Bahia preservam idades hidrotermais dentro dessa janela (Réquia et al., 2003; Tallarico et al., 2005; Melo et al., 2017). O Granito Buritirama, com ca. 2,55 Ga, registra magmatismo ferroano intraplaca na borda norte. Um inventário de quarenta e dois veios, diques, apófises e pequenos corpos félsicos, compilado nos manuscritos que dão base a este livro, acompanha o corredor Rio Verde-Cinzento. As relações de corte comprovam perfurações tardias do sistema, mas ainda faltam idades de cristalização para o conjunto. Toledo et al. (2024) mostraram ainda que zircões de 2,60 a 2,50 Ga em granitos mais antigos podem registrar crescimento hidrotermal, e não cristalização de magma. A função desses corpos como fontes simultâneas de calor, fluido e sobrepressão permanece hipótese a datar.

A concentração desse inventário no norte sugere controle paleogeográfico. O setor norte ocupava a borda que voltou a estirar; o sul respondia a outra posição dentro do bloco. A colisão de 2,10 a 2,05 Ga, assunto do capítulo 8, justapôs e deformou esses domínios. Parte do contraste entre os cinturões pode refletir duas paleogeografias reunidas mais tarde, além dos efeitos de preservação e exposição.

O segundo regime abre fraturas e alcança porções da pilha que o primeiro circuito pouco drenou. Outras águas entram na crosta, percorrem trajetos profundos, adquirem salinidade e circulam por caminhos novos. Isso permite acrescentar metal ao distrito e explica por que a

geração tardia contém tanto remobilização quanto entrada nova. Molibdênio e os outros elementos granitófilos pedem contribuição magmática; cobre, ouro e ferro registram também o volume de vulcânicas lavado pelo fluido.

O calendário muda outra vez entre 2,51 e 2,45 Ga. Grandes províncias ígneas e enxames de diques dessa idade marcam fragmentação de crátons em várias regiões do planeta (Ernst e Bleeker, 2010). Em Carajás, titanita e monazita hidrotermais preservam uma cauda de idades siderianas. Esta síntese interpreta essa cauda como pulso térmico e propõe chegada de material do manto profundo durante o rifte maduro. O teste é direto. Diques, soleiras ou derrames máficos de 2,51 a 2,45 Ga, com assinatura de manto profundo, precisam existir no bloco. Enquanto faltarem idades magmáticas, a pluma permanece hipótese.

9. Três gerações sobre a mesma planta

O empilhamento completo reúne um sistema exalativo de 2,76 a 2,73 Ga, um primeiro IOCG de 2,72 a 2,68 Ga e um segundo de 2,61 a 2,45 Ga. Condutos, chaminés e falhas da primeira geração orientam as seguintes. O processo muda de profundidade, de temperatura, de estado de oxidação e de fonte de metais. A planta guarda a memória das descargas anteriores.

Ler esse empilhamento exige entender o que cada relógio mede. Minerais como monazita, titanita e molibdenita cristalizam do fluido hidrotermal e datam o pulso que os formou. Mas um pulso quente posterior pode reabrir o relógio de um mineral antigo, apagar sua idade e gravar a sua. É o que se chama overprint, sobreposição. A abundância de idades de 2,57 a 2,55 Ga no norte convive com poucas âncoras preservadas de 2,72 a 2,68 Ga, justamente porque o pulso tardio foi mais intenso onde apagou os cronômetros antigos. Outros sistemas resistem melhor. Chumbo, boro e enxofre podem conservar a assinatura da fonte depois que os relógios de urânio, rênio ou samário foram reabertos. Em Salobo, chumbo neoarqueano em sulfetos e os núcleos isotópicos de turmalina ajudam a separar a idade da descarga final da história do

material transportado (Réquia et al., 2003; Melo et al., 2017).

Essa reocupação aproxima duas leituras que a literatura costuma opor, a do minério formado junto com a rocha, singenético, e a do minério introduzido depois, epigenético. Forma acamadada, exalitos laterais e rochas ricas em turmalina registram a construção vulcanogênica do sítio. Molibdenita, monazita e titanita datam pulsos muito posteriores em vários corpos. O minério ocupa o lugar preparado pelo sistema exalativo e cresce quando outro fluido chega. A posição guarda o primeiro evento; os minerais que o acompanham e os relógios registram os seguintes.

A proporção entre óxido e sulfeto varia com mistura, reação e acesso ao horizonte de ferro. Cristalino e Celesta ocupam circuitos com forte expressão de magnetita. Serra Verde e Antas North são mais sulfetados. Santa Lúcia sofreu ainda o efeito de níveis félsicos que selaram o sistema. Profundidade, isolada, explica pouco. O que importa é a trajetória do fluido, seu contato com reservatórios reativos e a força do componente magmático reduzido.

O tamanho segue outra variável. Condutos eficientes drenam grandes volumes, descomprimem, selam e reabrem. Sítios mais fechados reagem com a rocha, perdem capacidade e completam poucos ciclos. Brechas múltiplas, sucessões de cimento e corredores de alteração medem a maturidade do ponto de alívio. O gigante é um lugar que funcionou muitas vezes.

10. Buritirama, o rifte precursor

O magmatismo de ca. 2,55 Ga reabre a borda norte e inicia uma história longa. O Granito Buritirama registra esse pulso intraplaca. Zircões detríticos próximos de 2,535 Ga na Formação Buritirama demonstram erosão de fontes jovens e fornecem, pela regra da moeda no cofre, uma idade máxima de deposição. A plataforma pertence a uma etapa posterior. Os trabalhos publicados situam a sucessão carbonática e manganesífera no Riaciano, durante a aproximação entre Carajás e Bacajá

(Salgado et al., 2019a, 2019b, 2021). Sua estratigrafia e seu manganês serão retomados no capítulo 8.

Novolândia acrescenta uma hipótese paleogeográfica. Um granito de rifte com idade próxima de 2,57 Ga, herança neoarqueana e protólitos sedimentares ricos em zircões paleoarqueanos recupera partes do código de barras de Carajás. O fragmento pode ter sido destacado durante a abertura e devolvido pela colisão de 2,1 Ga. Proveniência, isótopos e geocronologia tornam a ligação plausível. Paleomagnetismo e continuidade estrutural ainda precisam fechar a conta.

A sequência da Sierra Madre Occidental ao Golfo da Califórnia mostra, em outra escala, como uma província de magmatismo félsico pode anteceder extensão focalizada, rifteamento e abertura oceânica (Ferrari et al., 2018). Em Carajás, o paralelo serve para pensar a passagem entre descarga magmática, margem estirada e deriva. O registro local sustenta o pulso intraplaca e uma margem em construção; a abertura de um oceano exigiria ofiolitos, magmatismo e bacias preservadas fora do núcleo cratônico. O capítulo 8 acompanha esses fragmentos até a colisão.

11. A metalogênese como unidade de mapa

O produto desse intervalo é um volume de crosta refeito. Albititos, rochas de cálcio e sódio com escapolita, zonas potássicas, brechas e corredores de silicificação atravessam a estratigrafia. Quando entram no mapa apenas como símbolos de alteração ao redor das minas, registram a história da exploração. Tratados como corpos geológicos, com contatos e fácies, passam a revelar gradientes e setores ainda cegos do sistema. É o que a literatura recente chama de sistemas metassomáticos, lidos em escala regional (Corriveau e Montreuil, 2025).

Os metais ocupam posições coerentes. Níquel e platina pertencem sobretudo aos reservatórios máfico-ultramáficos. Cobre e ouro acompanham os grandes circuitos de salmoura e lixiviação. Urânio aparece nos pulsos neoarqueanos e volta com associações granitófilas mais jo-

vens. O ferro de alto teor registra remoção de sílica, oxidação, deformação e intemperismo sobre o BIF original, como o capítulo 5 adiantou. O manganês pertence à plataforma riaciana e depende de outra atmosfera. Uma mesma arquitetura recebe processos distintos sem fundi-los numa gênese única.

A regra do caminho orienta a exploração. Um granito hospedeiro pode conter pouco cobre quando o fluido circulou apenas por granito. Uma brecha no embasamento pode ser fértil quando o circuito atravessou grande espessura de basalto. A proximidade horizontal do plúton vale menos que a conectividade em três dimensões entre ativação, reservatório e alívio. Estrutura indica o encanamento; a rocha a montante indica a carga.

O sistema também prevê relações espaciais. Minério de ferro de alto teor e cobre-ouro podem compartilhar corredores regionais porque dependem da mesma rede de permeabilidade. No cruzamento local, competem por trajetórias e reações. O empobrecimento de cobre na pilha deve crescer na direção dos maiores sistemas. As associações granitófilas devem aumentar perto das cúpulas de ativação. As brechas mais maduras devem conter mais clastos de cimento antigo e registrar maior número de pulsos.

O mapa final precisa incluir o que ainda está vazio. Domínios de manto hidratado, suturas profundas, densidade de diques, fácies de alteração, espessura da pilha máfica, posição do horizonte de ferro e história das sobreposições podem ser integrados como camadas do mesmo sistema. A metalogênese deixa então de ilustrar a geologia. Passa a ser uma forma de lê-la.

12. Níveis de confiança

São evidência a sucessão vulcanossedimentar e sua cronologia; a extensão de 2,76 a 2,73 Ga; os basaltos, granitoides e corpos acamadados alojados durante a abertura; o intervalo ferrífero espesso; as salinidades elevadas em inclusões fluidas; as idades hidrotermais agrupadas

em mais de uma geração; a alteração regional; e o Granito Buritirama. A plataforma carbonática e manganesífera é riaciana e pertence ao ciclo seguinte.

São modelos publicados o rifte continental ligado à ruptura de placa (Martins et al., 2017) e a alternativa com pluma, magma na base da crosta e extensão oblíqua sobre quilha cratônica (Teixeira et al., 2021), que concordam em rifte e herança litosférica e divergem no motor da abertura; a subsidência compensada, com análogos em bacias vulcânicas e riftes assistidos por magma; a válvula de falha para descargas episódicas sob sobrepressão; a mistura entre fluidos da bacia e magmáticos, recorrente em sistemas IOCG; e a leitura da alteração sódica e cálcica como parte de sistemas regionais.

São hipóteses deste livro a placa rasa de 2,83 a 2,76 Ga, sua hidratação do manto e a ruptura localizada pela sutura, herdadas do capítulo 4; o sistema hidrogeológico com recarga fria e descarga quente; a transferência de capacidade de oxidação a partir do horizonte de ferro; a adição de metal por duas gerações independentes; a pluma de 2,51 a 2,45 Ga; e Novolândia como fragmento devolvido da margem. Cada peça pode cair sem derrubar a cronologia extensional da bacia. Os testes já estão definidos. Séries magmáticas precisam mostrar a transição de fonte litosférica para participação do manto profundo; isótopos e geofísica devem ligar fertilidade à sutura; perfis verticais precisam medir estados de oxidação, cloro, boro, chumbo, enxofre e empobrecimento de cobre ao longo do circuito; diques máficos de 2,51 a 2,45 Ga decidiriam a pluma; paleomagnetismo e códigos de barras podem testar Novolândia. A força do modelo está na quantidade de maneiras pelas quais pode ser contrariado.

Conclusão

Entre 2,76 e 2,45 Ga, Carajás operou como um reator completo. Manto hidratado virou magma. Magma alimentou crosta, pilha vulcânica e calor. O oceano ferruginoso produziu o horizonte que passou a organizar pressão, reação e fluxo. Água do mar entrou na rocha, reagiu, virou

salmoura e alimentou circuitos sucessivos. Cúpulas e diques devolveram energia ao sistema. Cada descarga encontrou perfurações prontas e deixou outras para o pulso seguinte.

O minério resulta dessa continuidade. O substrato exalativo criou os primeiros condutos. O primeiro IOCG usou o motor granítico neoarqueano. O rifte de 2,61 a 2,55 Ga abriu caminhos novos. O pulso siderianо proposto prolongou a história até 2,45 Ga. Níquel e platina ficaram nos cumulatos; cobre, ouro, ferro e urânio viajaram por circuitos diferentes; o manganês esperou a plataforma e a atmosfera riacianas. A planta permaneceu. Mudaram o calor, o fluido e o tempo.

Geologia e metalogênese voltam a ser a mesma narrativa lida em escalas diferentes. A bacia desenha o sistema; a alteração revela o volume processado; o minério marca seus pontos de descarga. O reator neoarqueano perde intensidade e deixa o pulso intraplaca de Buritirama como precursor de outra margem. O próximo ciclo encontrará suturas, água e condutos já preparados. Antes dele, porém, o capítulo 7 volta à zona fótica para perguntar o que a vida fez com o mesmo mar enquanto a crosta trabalhava embaixo.

Referências

Barros, C. E. M.; Sardinha, A. S.; Barbosa, J. P. O.; Macambira, M. J. B. (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. The Canadian Mineralogist, 47, 1423–1440.

Barton, M. D.; Johnson, D. A. (1996). Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. Geology, 24, 259–262.

Begg, G. C. et al. (2010). Lithospheric, cratonic, and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits. Economic Geology, 105, 1057–1070.

Bekker, A.; Slack, J. F.; Planavsky, N.; Krapež, B.; Hofmann, A.; Konhauser, K. O.; Rouxel, O. J. (2010). Iron formation: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. Economic Geology, 105, 467–508.

Best, M. G.; Christiansen, E. H.; de Silva, S.; Lipman, P. W. (2016). Slab-rollback ignimbrite flareups in the southern Great Basin and other Cenozoic American arcs: a distinct style of arc volcanism. Geosphere, 12, 1097–1135. https://doi.org/10.1130/GES01285.1

Cathles, L. M.; Guber, A. L.; Lenagh, T. C.; Dudás, F. Ö. (1983). Kurokotype massive sulfide deposits of Japan: products of an aborted island-arc rift. Economic Geology Monograph, 5, 96–114.

Corriveau, L.; Montreuil, J.-F. (2025). Metasomatic mineral systems with IOA, IOCG, and affiliated critical and precious metal deposits: a review from a field geology perspective. Minerals, 15, 365. https://doi.org/10.3390/min15040365

Cox, S. F. (2005). Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 39–75.

Dall'Agnol, R. et al. (2017). Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoarchean ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton. Lithos, 277, 3–32. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.09.032

Dreher, A. M.; Xavier, R. P.; Taylor, B. E.; Martini, S. L. (2008). New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás Province, Brazil. Mineralium Deposita, 43, 161–184.

Ernst, R.; Bleeker, W. (2010). Large igneous provinces, giant dyke swarms, and mantle plumes: significance for breakup events within Canada and adjacent regions from 2.5 Ga to the present. Canadian Journal of Earth Sciences, 47, 695–739.

Fabre, S.; Nédélec, A.; Poitrasson, F.; Strauss, H.; Thomazo, C.; Nogueira, A. (2011). Iron and sulphur isotopes from the Carajás mining

province (Pará, Brazil): implications for the oxidation of the ocean and the atmosphere across the Archaean-Proterozoic transition. Chemical Geology, 289, 124–139.

Feio, G. R. L. et al. (2013). Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil. Precambrian Research, 227, 157–185.

Ferrari, L.; Orozco-Esquivel, T.; Bryan, S. E.; López-Martínez, M. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. Earth-Science Reviews, 183, 115–152.

Govers, R.; Wortel, M. J. R. (2005). Lithosphere tearing at STEP faults: response to edges of subduction zones. Earth and Planetary Science Letters, 236, 505–523.

Grainger, C. J.; Groves, D. I.; Tallarico, F. H. B.; Fletcher, I. R. (2008). Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, southern Amazon Craton, Brazil: varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralisation. Ore Geology Reviews, 33, 451–489.

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

Hühn, S. R. B.; Paula, R. N.; Ferreira Fonseca, F. J.; Barreira, I. B. (2025). Geology and hydrothermal evolution of the Antas North iron sulfide-copper-gold deposit in the Carajás Mineral Province. Minerals, 15, 1081. https://doi.org/10.3390/min15101081

Humphreys, E. D.; Hessler, E.; Dueker, K. G.; Farmer, G. L.; Erslev, E. A.; Atwater, T. (2003). How Laramide-age hydration of North American lithosphere by the Farallon slab controlled subsequent activity in the western United States. International Geology Review, 45, 575–595. https://doi.org/10.2747/0020-6814.45.7.575

Lightfoot, P. C.; Evans-Lamswood, D. (2015). Structural controls on the primary distribution of mafic-ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co (PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces. Ore Geology Reviews, 64, 354–386.

Machado, N.; Lindenmayer, Z.; Krogh, T. E.; Lindenmayer, D. (1991). U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. Precambrian Research, 49, 329–354.

Marschik, R.; Mathur, R.; Ruiz, J.; Leveille, R. A.; de Almeida, A.-J. (2005). Late Archean Cu-Au-Mo mineralization at Gameleira and Serra Verde, Carajás Mineral Province, Brazil: constraints from Re-Os molybdenite ages. Mineralium Deposita, 39, 983–991.

Martins, P. L. G. et al. (2017). Neoarchean magmatism in the southeastern Amazonian Craton, Brazil: petrography, geochemistry and tectonic significance of basalts from the Carajás Basin. Precambrian Research, 302, 340–357. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.013

Melo, G. H. C. et al. (2017). Temporal evolution of the giant Salobo IOCG deposit, Carajás Province, Brazil: constraints from paragenesis of hydrothermal alteration and U-Pb geochronology. Mineralium Deposita, 52, 709–732.

Mesquita, C. J. S. et al. (2025). Crystallization parameters and thermodynamic modeling of the Igarapé Gelado suite: implications for the Neoarchean magmatism of the Carajás province, Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 105357. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.1053

Moreto, C. P. N. et al. (2015). Neoarchean and Paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossego deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb geochronological evidence. Economic Geology, 110, 809–835.

Ohmoto, H. (1996). Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: the Kuroko perspective. Ore Geology Reviews, 10, 135–177.

Réquia, K.; Stein, H.; Fontboté, L.; Chiaradia, M. (2003). Re-Os and Pb-

Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. Mineralium Deposita, 38, 727–738.

Rossignol, C.; Rego, E. S.; Narduzzi, F.; Philippot, P. (2020). Stratigraphy and geochronological constraints of the Serra Sul Formation, Carajás Basin, Amazonian Craton, Brazil. Precambrian Research, 351, 105981. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105981

Salgado, S. S.; Caxito, F. A.; Queiroga, G. N.; Castro, M. P. (2019a). Stratigraphy, petrography and tectonics of the manganese-bearing Buritirama Formation, Northern Carajás Domain, Amazon Craton. Brazilian Journal of Geology, 49, e20180106. https://doi.org/10.1590/2317-4889201920180106

Salgado, S. S.; Caxito, F. A.; Silva, R. C. F.; Aranda, R. (2021). Metallogenetic Mn-model of the Rhyacian-aged Buritirama Formation, Carajás Domain, Amazon Craton. Ore Geology Reviews, 138, 104396. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104396

Salgado, S. S.; Caxito, F. A.; Silva, R. C. F.; Lana, C. (2019b). Provenance of the Buritirama Formation reveals the Paleoproterozoic assembly of the Bacajá and Carajás blocks and the chronocorrelation of Mn deposits in northern Brazil and West Africa. Journal of South American Earth Sciences, 96, 102364. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102364

Sardinha, A. S.; Barros, C. E. M.; Krymsky, R. (2006). Geology, geochemistry, and U-Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Province. Journal of South American Earth Sciences, 20, 327–339.

Sibson, R. H. (1990). Conditions for fault-valve behaviour. Geological Society, London, Special Publications, 54, 15–28.

Tallarico, F. H. B. et al. (2005). Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: an Archean example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. Economic Geology, 100, 7–28.

Tavares, F. M.; Trouw, R. A. J.; Silva, C. M. G.; Justo, A. P.; 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, 88, 238–252.

Teixeira, N. A. et al. (2021). Carajás Mineral Province –- Example of metallogeny of a rift above a cratonic lithospheric keel. Journal of South American Earth Sciences, 108, 103091.

Toledo, P. I. F. et al. (2024). Breaking up the temporal link between granitic magmatism and iron oxide-copper-gold deposits in the Carajás Mineral Province, NW Brazil. Mineralium Deposita, 59, 601–625. https://doi.org/10.1007/s00126-023-01224-5

Toledo, P. I. F.; Moreto, C. P. N.; Xavier, R. P. et al. (2019). Multistage evolution of the Neoarchean Igarapé Cinzento (GT-46) iron oxide copper-gold deposit, Cinzento Shear Zone, Carajás Province, Brazil. Economic Geology, 114, 1–34.

Trendall, A. F.; Basei, M. A. S.; de Laeter, J. R.; 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, 11, 265–277.

Wortel, M. J. R.; Spakman, W. (2000). Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. Science, 290, 1910–1917.

Xavier, R. P. et al. (2012). The iron oxide copper-gold systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. Society of Economic Geologists Special Publication, 16, 433–454.